

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měřicí pracoviště pro testování FV článků metodou LBIC

**vedoucí práce: Ing. Milan Bělík
autor: Michal Klečka**

2012

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou fotovoltaických článků, konkrétně jejich základním popisem. V úvodu jsou sepsány důležité procesy a děje, které jsou součástí přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Dále jsou rozebrány důležité vlastnosti a parametry fotovoltaických článků. Ve druhé části této práce jsou vysvětleny možné defekty fotovoltaických článků a také metody testování. Následuje návrh měřícího pracoviště pro testování fotovoltaických článků metodou LBIC.

Klíčová slova

fotovoltaický článek, fotovoltaický jev, fotoelektrický jev, fotoemise, fotovodivost, plotter, metoda LBIC

Abstract

This thesis deals with the problematics of photovoltaic cells, concretely with their fundamental description. The introduction describes the important processes and phenomena which are a part of the sun energy transformation into the electrical energy. Additionally, important properties and parameters of photovoltaic cells are discussed. In the second part are explained possible defects of photovoltaic cells and also the methods for testing them. This is followed by the design of the workplace intended for testing photovoltaic cells using the metod LBIC.

Key words

Photovoltaic cell, photovoltaic effect, photoelectric effect, photoemission, photoconductivity, plotter, method LBIC

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni, dne 10.5.2012

Michal Klečka

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi za cenné rady a připomínky při tvorbě této práce.

Obsah

ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI FV ČLÁNKŮ	10
1.1 FOTOLEKTRICKÝ JEV	10
1.2 STRUKTURA FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU	15
1.3 DRUHY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	17
1.4 MATERIÁLY PRO VÝROBU FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	21
1.5 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	23
1.6 MATEMATICKÝ MODEL FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU	28
2 ZÁKLADNÍ METODY TESTOVÁNÍ A ZKOUŠENÍ FV ČLÁNKŮ	31
2.1 DEFEKTY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	31
2.2 METODY TESTOVÁNÍ A ZKOUŠENÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	34
3 NÁVRH MĚŘÍCIHO PRACOVIŠTĚ METODY LBIC	42
3.1 ROZLOŽENÍ PRACOVIŠTĚ	42
3.2 ŘEŠENÍ POHYBLIVÉ ČÁSTI	42
3.3 ZÁKLADNÍ POPIS PLOTTERU	43
3.4 ZPŮSOB PROPOJENÍ PLOTTERU S PC	44
3.5 ŘÍZENÍ PLOTTERU POMOCÍ PC	45
3.6 PROGRAMOVÁNÍ PLOTTERU	46
3.7 PROGRAMOVÁNÍ PLOTTERU PRO MĚŘENÍ POMOCÍ LBIC	46
ZÁVĚR	51
PŘÍLOHA	52
SEZNAM OBRÁZKŮ	54
POUŽITÁ LITERATURA	56

Úvod

Tato práce je zaměřená na seznámení se s fotovoltaickými články a pochopení principů přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Úvodní kapitoly zahrnují popis fotovoltaických článků a jejich základní parametry. Jsou zde důkladně popsány jednotlivé druhy fotovoltaických článků a také materiály, ze kterých se vyrábí. V další kapitole jsou rozebrány jednotlivé druhy defektů fotovoltaických článků, které mohou vzniknout již při výrobě, nebo se špatnou manipulací. Pro zjišťování těchto defektů jsou dále popsány základní metody testování fotovoltaických článků. Poslední kapitola nabízí návrh řešení pro testování fotovoltaických článků metodou LBIC. K tomuto návrhu je využit starší souřadnicový zapisovač (plotter). Jsou zde popsány dvě metody řízení činnosti plotteru. Jedná se o metodu použití specializovaného grafického systému a metodu vytvoření uživatelského programu.

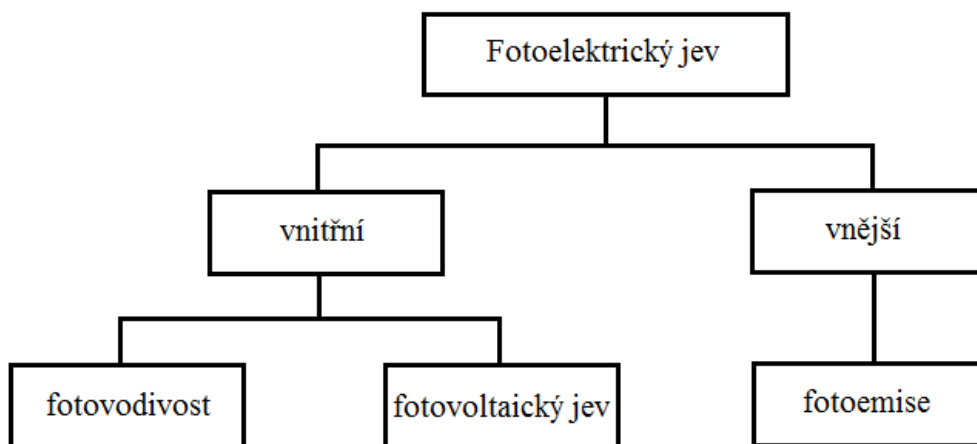
Seznam symbolů

$E [J]$	.....	energie
$h [J\cdot s]$	.....	Planckova konstanta ($6.625\cdot 10^{-34}$ J·s)
$f [Hz]$	.....	frekvence
$c [m/s]$	.....	rychlost světla ve vakuu ($3\cdot 10^8$ m/s)
$\lambda [m]$	.....	vlnová délka
$R_m [\Omega]$	.....	vnitřní odpor fotovoltaického článku
$U_m [V]$	.....	napětí, při kterém dodává fotovoltaický článek maximální výkon
$I_m [A]$	.....	proud, při kterém dodává fotovoltaický článek maximální výkon
FF	.....	Fill factor
$U_{OC} [V]$	.....	napětí fotovoltaického článku naprázdno
$I_{SC} [A]$	.....	proud fotovoltaického článku nakrátko
$\eta [\%]$	.....	účinnost
$\eta_{el} [\%]$	.....	elektrická účinnost
$P_m [W]$	.....	maximální výkon, který může fotovoltaický článek dodat
$P_{rad} [W]$	.....	výkon dopadajícího záření
$E [lx]$	.....	intenzita osvětlení
$A_C [S]$	.....	plocha fotovoltaického článku
$I [A]$	.....	proud
$I_0 [A]$	.....	proud v závěrném směru
$U_t [V]$	.....	teplotní napětí
$I_L [A]$	.....	fotoproud
D	.....	polovodičová dioda
$R_{SO} [\Omega]$	.....	sériový odpor fotočlánku
$R_{SH} [\Omega]$	.....	paralelní odpor fotočlánku
$R_L [\Omega]$	.....	zátěž
$k_B [J\cdot K^{-1}]$	.....	Boltzmannova konstanta
$I_D [A]$	.....	proud diodou
$T [^\circ C]$	.....	teplota

1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI FV ČLÁNKŮ

1.1 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev je založen na principu přeměny dopadajícího světelného záření na elektrickou energii. Intenzivní výzkum tohoto jevu byl zahájen v padesátých letech dvacátého století hlavně z důvodu hledání nového zdroje energie pro kosmický výzkum a průmysl. Poprvé byly fotovoltaické články použity v roce 1958 na americké družici Avantgard a poté na sovětské družici Sputnik 3. Fotoelektrický jev je ale známý již od roku 1839 díky francouzskému fyzikovi Alexandru Edmondu Becquerelovi, otci Henryho Becquerela, který později objevil radioaktivitu. Alexander E. Becquerel dělal pokusy se dvěma kovovými elektrodami umístěnými v elektrovedivém roztoku a zjistil, že při osvětlení zařízení se zvýšilo napětí na elektrodách, tím tento jev objevil. Výklad tohoto jevu však dokázal objasnit až Albert Einstein v roce 1905 a v roce 1922 za tuto práci obdržel Nobelovu cenu za fyziku. Tuto cenu dostal za výklad vnějšího fotoelektrického jevu, který se nazývá fotoemise. V současné době rozlišujeme vnější a vnitřní fotoelektrický jev. Vnitřní fotoelektrický jev má dvě formy, jedná se o fotovodivost a fotovoltaický jev.



Obr. 1.1 – rozdělení fotoelektrického jevu

Fotoemise

Vnější fotoelektrický jev, který se nazývá fotoemise, způsobuje emisi valenčních elektronů pohlcením elektromagnetického záření z povrchu ozářené látky. K této emisi dochází bezprostředně po dopadu elektromagnetického záření, a to bez ohledu na jeho intenzitu. Fotoemise vychází z toho, že každé záření má obecně duální charakter, tedy charakter vlnění a charakter částicový. Skládá se z částic, které je tvořeno fotony. Ty mají za určitých podmínek vlastnosti vln. Energii, kterou částice nesou, popisuje následující rovnice

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \text{ kde} \quad (\text{R 1.1})$$

E – energie [J]

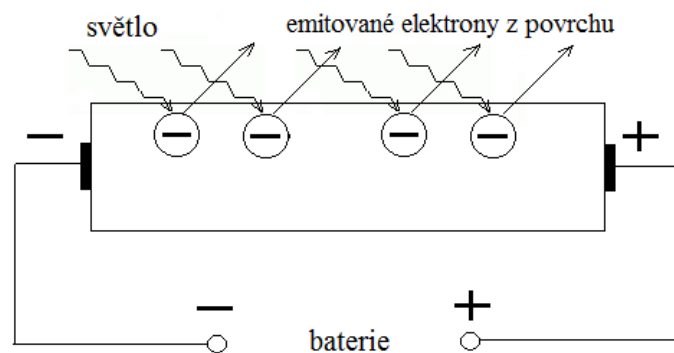
h – Planckova konstanta ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s)

f – frekvence [Hz]

c – rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m/s)

λ – vlnová délka [m]

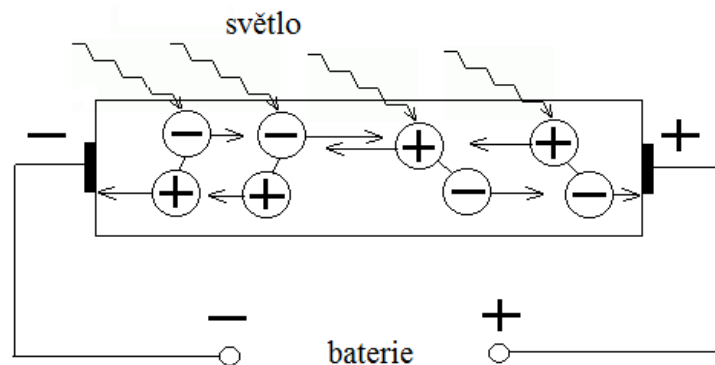
Pokud je na povrch materiálu dodána energie popsána v rovnici (R 1.1), mohou se valenční elektrony v krystalické mřížce odtrhnout. Množství energie, která je pro zmíněný jev potřebná, závisí na vlnové délce dopadajícího záření a také na materiálu, na který toto záření dopadá. Z rovnice (R 1.1) je patrné, že s rostoucí frekvencí (kratší vlnovou délkou) záření energie částic roste. Nejmenší energii, kterou je nutné dodat, aby mohl elektron vystoupit z povrchu materiálu, označujeme jako výstupní práci látky E_a . Tato výstupní práce závisí na hraniční vlnové délce záření λ_g . Z této závislosti platí podmínka, kdy může vnější fotoefekt nastat. Je-li vlnová délka záření λ menší než hraniční vlnová délka λ_g , dochází k fotoemisi. V případě, že tato podmínka splněna není, k fotoemisi nedojde. Mezi skupinu materiálů, které mají nejmenší výstupní práci E_a , patří alkalické kovy např. cesium, draslík, sodík a lithium. Hodnota výstupní práce těchto prvků se pohybuje okolo 2 eV. U ostatních materiálů je hodnota výstupní práce dvojnásobně až trojnásobně vyšší, ale jejich vlnová mez se nachází v oblasti ultrafialového záření, a proto u nich při ozáření viditelným světlem nedochází k fotoemisi a nelze je k vnějšímu fotoefektu využít. Tento jev má velký fyzikální význam, ale pro výrobu elektrické energie je nevhodný, jelikož elektrony z látky uvolněné nemohou být technicky využity k výrobě proudu. Hlavní příčinou je účinnost přeměny zářivé energie na energii elektronů, která se pohybuje v oblasti setin procenta. Tento jev se využívá pouze pro registraci světelných toků pomocí fotonek a fotonásobičů.



Obr. 1.2 – fotoemise

Fotovodivost

Fotovodivost je jev, při kterém absorpcí kvanta záření uvnitř pevné látky může být některý elektron vázaný v této látce vybuzen do vyššího energetického stavu, takže se stává volným a může zprostředkovat vodivost. Zvýšení vodivosti polovodičů je tedy závislé na velikosti absorbovaného světla. Využití tohoto jevu se realizuje pomocí fotovoltaických článků, které využívají jako materiál většinou křemík. Čistý křemík, který obsahuje malé množství příměsí, je při nižších teplotách poměrně dobrý izolant, protože je v něm málo volných elektronů. Stoupne-li teplota, začnou se uvolňovat volné nosiče proudu a odpor krystalu klesá, protože vyšší teplota způsobí zvyšování kmitů atomu v krystalu. Tam, kde se uvolnila vazba a vzniknul volný elektron, vzniká zároveň kladná díra. Tyto díry představují volné nosiče náboje, které se mohou v krystalu pohybovat. Čistý křemík tedy získává při větší teplotě elektrickou vodivost, kterou nazýváme vlastní. Na obrázku 1.2 je popsán princip fotovodivosti. Pokud připojíme baterii k polovodičovému materiálu, dojde k transportu náboje a obvodem poteče proud. Záření podporuje vznik tohoto proudu, který je v podstatě zajištěn baterií. Přímá přeměna světelného záření na elektrický proud zde ale nenastává. Energie světelného záření se sice přeměňuje na energii elektronů uvnitř materiálu, ale energie nutná k tomu, aby nastal jejich usměrněný pohyb se odebírá z baterie. Aby došlo ke vzniku volných nábojů, musela by světelná energie stačit na to, aby překonala energetický rozdíl mezi valenčním a vodivostním pásem polovodiče.



Obr. 1.3 – fotovodivost

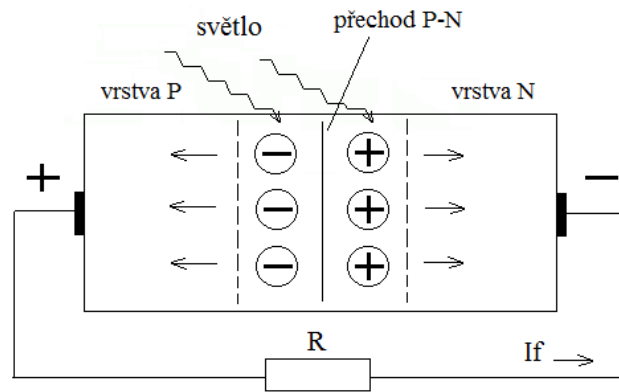
Fotovoltaický jev

Tento jev vzniká při vzájemném působení slunečního záření, které dopadá na polovodičovou strukturu, přičemž dochází k pohlcování fotonů a uvolňování elektronů. Fotony jsou částice solární energie. Každý z nich má určitou vlnovou délku, která zároveň určuje, jak velkou energii daný foton obsahuje. Z toho vyplývá, že energie fotonů je závislá na vlnové délce spektra světelného záření. Čím kratší je vlnová délka záření, tím větší energii

mají jeho fotony. Po dopadu fotonu na fotovoltaický článek se tento foton buď odrazí, nebo je článkem pohlcen. V případě, že by měl foton dostatek energie, může článkem projít i skrz. Aby se mohly z krystalické mřížky křemíku uvolňovat elektrony, musí mít fotony záření energii alespoň 1,12 eV. Této energii odpovídá mezní vlnová délka v oblasti infračerveného záření, zhruba 1105 nm. Fotony záření s kratší vlnovou délkou např. fotony viditelného světla mají dostatek energie a mohou tedy elektrony z mřížky uvolnit. Záření s větší vlnovou délkou jako např. mikrovlny již fotovoltaický jev nevyvolají, protože klesá hloubka vniku fotonů vlivem nižší energie. Z hlediska fotovoltaiky nás tedy zajímají fotony, které mají dostatečnou energii a jsou článkem pohlceny. Pouze ty jsou schopny produkovat elektrickou energii. Pohlcený foton předá svou energii elektronu v atomu článku, který je vyroben z polovodičového materiálu. Elektron, který takto získal energii z pohlceného fotonu, je schopen uvolnit se od jádra atomu a stává se částí elektrického obvodu. Po opuštění pozice zůstává po elektronu díra, která má kladný náboj – tím dojde ke generaci páru elektron – díra. Po generaci páru elektron – díra se na přechodu P-N vytvoří elektrické pole.

Fotovoltaický jev je založen na záměrném znečištění polovodičového materiálu například křemíku určitými cizími atomy tak, aby získal žádané elektrické vlastnosti. Polovodiče obsahující tyto cizí atomy respektive příměsi, se nazývají příměsové. Pokud je polovodič dotován cizími atomy, změní se velice silně výsledná vodivost látky. K dotování se používají většinou trojmocné nebo pětimocné prvky. Vodivost se u příměsových polovodičů výrazně mění jen při nízkých teplotách, při pokojové teplotě je na teplotě nezávislá. Zaměříme-li se na křemík, protože je nejpoužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků zjistíme, že množství 10^6 jeho atomů je možné dotovat jedním atomem příměsi. Při normální pokojové teplotě má 1 mm^3 křemíku přibližně 10^{16} nosičů náboje. Jestliže ho budeme dotovat příměsí, pak se koncentrace nosičů náboje zvýší zhruba o dva až šest řádů. Pokud je čistý křemík, který má čtyři valenční elektrony dotován pětimocným prvkem např. antimonem (Sb), arsenem (As) nebo fosforem (P), pak je v krystalické mřížce čtyřmocný prvek nahrazen pětimocným. Pro vazbu v mřížce jsou však nutné jen čtyři elektrony. Pátý volný elektron tedy krouží kolem atomu antimonu, ke kterému je slabě přitahován. Protože je pátý elektron vázán k atomu antimonu jen malou silou, stačí poměrně malá energie, aby byl od tohoto atomu odtržen a vytvořil tak volný záporný nosič náboje tím, že přejde do vodivostního pásu. Majoritní nosiče náboje tedy tvoří počet $10^{18} - 10^{22}/\text{mm}^3$ nosičů náboje v příměsovém vodiči a dále koncentraci $10^{16}/\text{mm}^3$ nosičů vlastní vodivosti. Množství kladných děr, kterých je pouze $10^{16}/\text{mm}^3$ vzniklé ve valenčním pásu, reprezentují minoritní nosiče náboje. Křemík s příměsí atomů pětimocného prvku dodává

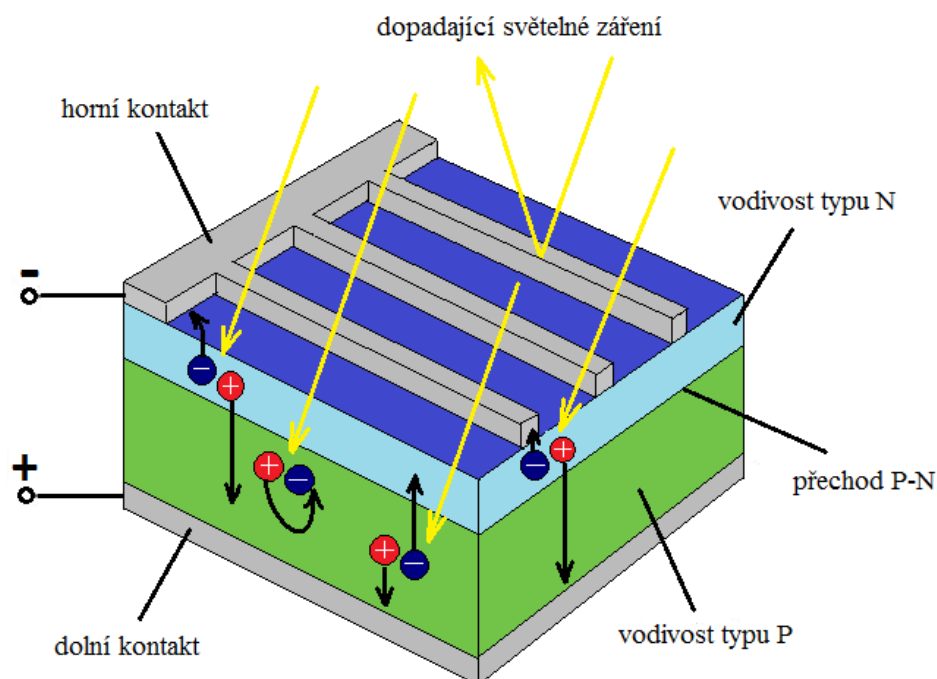
volné nosiče náboje do vodivostního pásu a nazývá se donor. Obecně se takový polovodič označuje jako polovodič typu N (negativní). Pokud je křemík dotován trojmocným prvkem např. indiem (In), borem (B), hliníkem (Al) nebo Galiem (Ga) podílí se na vazbě v krystalické mřížce pouze třemi elektrony a potřebuje chybějící čtvrtý elektron. Ten může být dodán ze sousední vazby v mřížce v důsledku tepelné energie. Dodáním chybějícího elektronu do vazby z valenčního pásu se vytvoří díra, která se může volně pohybovat krystalem a materiál se stane vodivým. Stejně jako u polovodiče typu N se sečtou koncentrace nosičů z příměsi a děr jako nosičů s vlastní vodivostí. Majoritními nosiči náboje jsou kladné díry a minoritní nosiče náboje tvoří elektrony. Tato vodivost se označuje jako děrová. Polovodiče s děrovou vodivostí se označují jako polovodiče typu P (pozitivní). Mezi polovodiči typu P a typu N nacházejícími se v těsném kontaktu vzniká hraniční vrstva s důležitými vlastnostmi. Volné nosiče v obou oblastech mohou materiálem volně difundovat. Pokud nastane stav, kdy je některá oblast dotovaná určitým typem příměsi více než jiná, pak se volné nosiče náboje přemisťují z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací ve snaze dosáhnout rovnováhy. Díry se přemisťují z polovodiče typu P do polovodiče typu N, zatímco pohyb elektronů probíhá opačným směrem. V hraniční oblasti mohou elektrony z polovodiče typu P rekombinovat s děrami, proto bude hraniční oblast ochuzena o volné nosiče a bude mít větší měrný odpor. Vrstva, která má větší měrný odpor, se nazývá též hradlová. V této vrstvě se mění potenciál, jehož spád zabráňuje dalšímu uskutečňování difúze. Na rozhraní mezi polovodičem a kontakty, které představují elektrody, vznikají zmíněné hradlové vrstvy s rozdílnými potenciály. Pokud se ale nachází v uzavřeném elektrickém obvodu, rozdíly potenciálů dosáhnou vyrovnaných hodnot a nelze je využít jako zdroje proudu. V případě, že na P-N přechod začne dopadat záření, dojde k hradlovému efektu a vznikne fotoelektrické napětí a fotoelektrický proud. Velice zjednodušeně si tedy fotovoltaický článek dle obrázku 1.4 můžeme představit jako polovodičovou diodu, jejímž základem je tenká křemíková vrstva s vodivostí typu P, na kterou se při výrobě vytvoří tenká vrstva polovodiče typu N. Tyto vrstvy mezi sebou vzájemně tvoří již zmíněný přechod P-N. Pokud ke každé z těchto tenkých destiček připevníme kovový kontakt a celý okruh uzavřeme, naměříme při dopadu slunečního záření na takto vytvořenou strukturu protékající elektrický proud. Vznikne tím fotoelektrický jev, který spočívá v uvolňování záporných elektronů z krystalické mřížky. Na přechodu P-N se při dopadu slunečního záření vytvoří elektrické napětí, které dosahuje u jednoho křemíkového článku velikosti zhruba 0,5 V a proudu až 3 A. V současné době na principu fotovoltaického jevu pracuje řada součástí běžně užívaných v elektrotechnice.



Obr. 1.4 – fotovoltaický jev

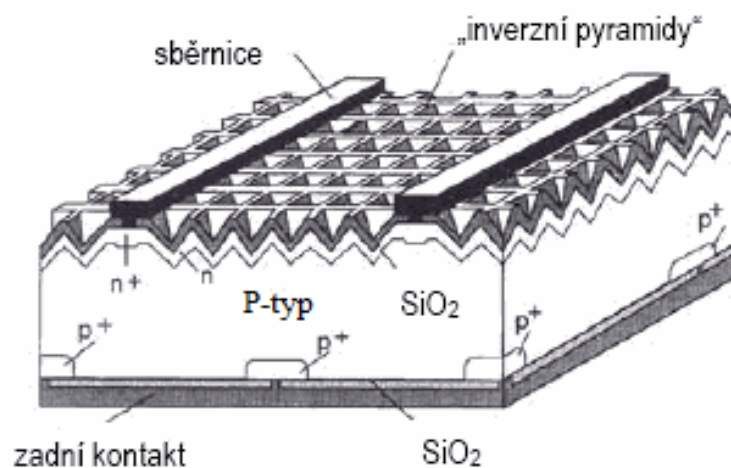
1.2 Struktura fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek je dle obrázku 1.5 složen z několika vrstev. Spodní vrstva tvoří dolní kontakt, je tedy vodivá a nachází se na spodní straně křemíkové destičky. Tato vrstva je nanesena ve tvaru husté mřížky. Nad touto vrstvou se nachází vrstvička P^+ , která je tenká řádově desetiny μm a obsahuje vysokou dotaci příměsí. Nad ní následuje již řádově stovky μm tlustá vrstva křemíku typu P, která obsahuje menší obsah příměsí. Následuje P-N přechod a vrstva křemíku typu N, tenká zhruba do 1 μm . Ta obsahuje nízkou dotaci příměsí. Tato vrstva je pokryta sběrnou vodivou pastou a antireflexní vrstvou nitridu. Nejvyšší vrstva je opět vodivá a tvoří tzv. horní kontakt. Horní a dolní kontakt mají za úkol odvádět vyrobený proud z článku.



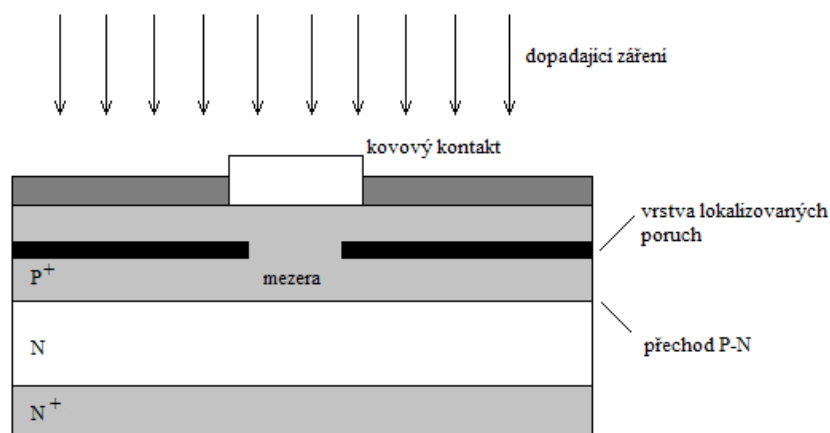
Obr. 1.5 – řez a naznačení principu fotovoltaického článku

Při konstrukci fotovoltaického článku se snažíme maximalizovat úsporu materiálů a naopak minimalizovat optické a elektrické ztráty. K optickým ztrátám dochází následkem odrazu a neúplné absorpce záření. U křemíkových článků se pohybuje odrazivost až okolo 30%. Použitím vhodné antireflexní vrstvy lze tuto odrazivost snížit pod 10%. Vývoj této technologie začal v druhé polovině osmdesátých let a byl spojen se zdokonalením funkce antireflexní vrstvy pomocí texturace povrchu. Za použití vhodného selektivního leptadla lze na povrchu vzorku vytvořit malé pyramidy. Světlo se při dopadu na takový povrch z části odrazí i dolů, kde může proniknout do článku. Horní osvětlovaná část plní zároveň funkci kontaktu a odvádí elektrický proud, který je vyvolán fotoelektrickým napětím. V roce 1994 byla realizována dokonalá struktura s minimální odrazivostí u struktury nazvané PEARL (viz obr. 1.6) pomocí anisotropního leptání přes oxidovou masku na výchozím monokrystalickém křemíku. U této struktury byla dosažena účinnost 24%. Texturace povrchu je tedy velice významným prostředkem, který pomáhá ke zvýšení účinnosti sériově vyráběných článků.



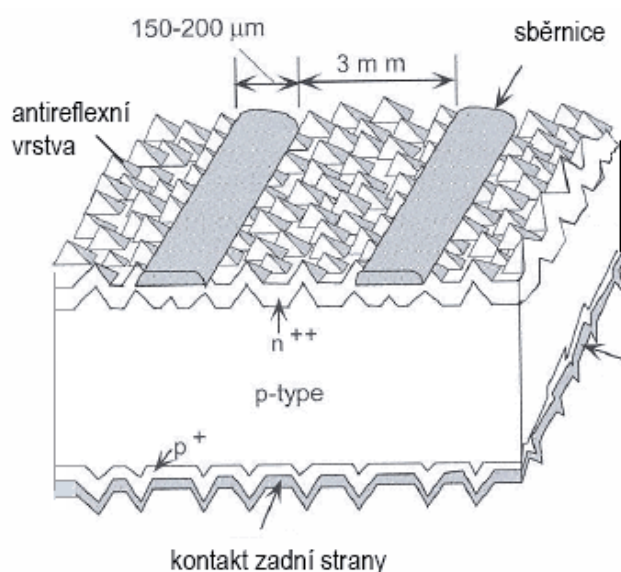
Obr. 1.6 – struktura texturovaného článku, převzato z [11]

Místo texturizace povrchu článku leptáním lze pro snížení ztrát použít i tzv. pasivovaný emitor (PESC). Při této technice se používá laserového žlábkování a uložených kontaktů. Metodu laserové texturace je možné použít jak pro maloplošné, tak i pro velkoplošné krystalické křemíkové články. Nejefektivnější struktura pro fotovoltaické články s vysokou účinností se nazývá PERC. U této konstrukce křemíkových článků je provedeno zabudování defektní vrstvy na přechod P-N mezi dopované vrstvy, dobře je to viditelné na obrázku 1.7. Velice se tím sníží ztráty způsobené rekombinací, protože neporušený křemíkový materiál má v díře menší odpor než materiál v oblasti mimo defektní díru a nosiče náboje preferují pohyb přes přechod P-N právě touto dírou.



Obr. 1.7 – fotovoltaický článek s lokální defektní vrstvou

V současné době se vakuově napařované, či napařované kontakty nahrazují síťotiskovou metodou, došlo tedy k odstranění metody fotolitografie. Pomocí této techniky se výrazně zjednodušila a zlevnila technologie článků. Současná běžně používaná struktura fotovoltaických článků je znázorněna na obrázku 1.8. Další ztráty vznikají odporem povrchové vrstvy, tudíž je nezbytné ji opatřit kovovou mřížkou nebo vodivou průhlednou elektrodou. Mřížková elektroda musí být navržena tak, aby ztráty způsobené stíněním mřížky a také její elektrický odpor byly co nejmenší.

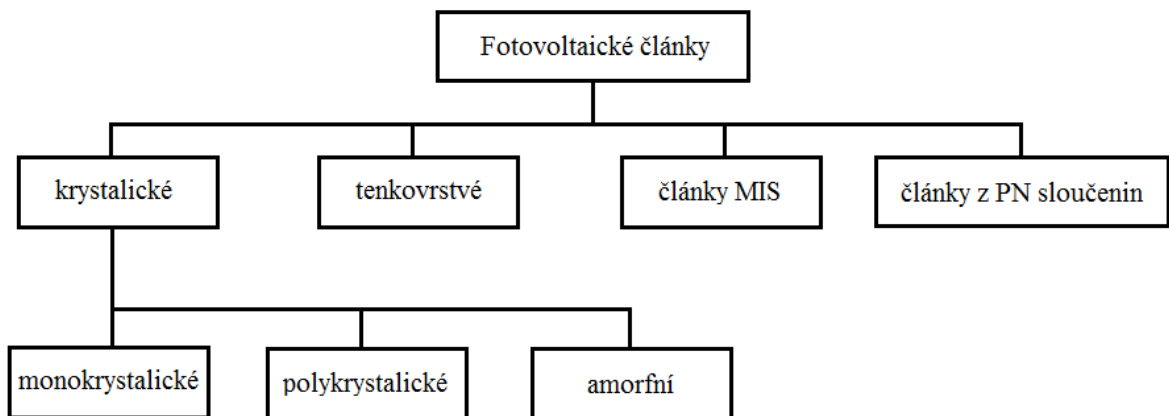


Obr. 1.8 – struktura současných fotovoltaických článků, převzato z [11]

1.3 Druhy fotovoltaických článků

Fotovoltaické články lze rozdělit do několika základních skupin podle výroby. Jedná se především o technologii tenkých nebo tlustých vrstev a dále na články typu MIS a články z PN sloučenin. Klasické křemíkové, lépe řečeno tlustovrstvé články se dělí na monokrystalické, polykrystalické a amorfni. Závisí při tom na použitém druhu křemíku.

Tenkovrstvé články se vyrábí převážně z amorfního křemíku.



Obr. 1.9 – základní rozdělení druhů FV článků

Technologie tenkých a tlustých vrstev

Fotovoltaické články se vyrábí metodou tenkých nebo tlustých vrstev. Pokud je tento článek tvořen polovodičovou P-N diodou, jedná se o technologii tlustých vrstev. Takových článků je v současnosti na trhu více než 85%. Tyto články se vyrábí z křemíkových plátků, ať už z monokrystalického nebo polykrystalického křemíku a jejich tloušťka se pohybuje v rozmezí 0,2 – 0,3 mm. Tomu také odpovídá poměrně velké množství základního materiálu. U metody tenkých vrstev je fotovoltaický článek tvořen nosnou plochou, na které jsou napařené velmi tenké vrstvy amorfního nebo mikrokrytalického křemíku, které mají tloušťku pouze několik mikrometrů. Díky této tloušťce se ušetří množství materiálu na jejich výrobu, proto jsou levnější. Lépe se také využije dopadající záření, protože vzdálenost k přechodu P-N je kratší než u klasických článků. Nejběžnější tenkovrstvé fotovoltaické články jsou vyrobeny z amorfního křemíku nebo z polovodičových sloučenin $\text{CuInSe}_2 - \text{ZnO}$ či $\text{CdTe} - \text{CdS}$. Účinnost těchto článků je v rozmezí 12 – 14%. Možnou nevýhodou může být jejich kratší životnost.

Monokrystalické články

Monokrystalické články se vyrábí podle svého názvu z monokrystalického křemíku. Tyto články se skládají z několika vrstev, přičemž na spodní i vrchní straně je nanášena vodivá metalizace, která odvádí proud z článku. Samotný článek se vyrábí z kusu monokrystalického křemíku, který má tvar osmiúhelníku tmavé barvy. Jedná se o velice čistý materiál, používaný v běžných mikroelektronických aplikacích. Destičky pro fotovoltaické články se vyrábí z křemíkových ingotů, které byly vyrobeny metalurgickou cestou ze surového křemíku. Tyto ingoty se rozdělí na tenké destičky a provede se jejich úprava, hlavně

po obvodu. Takto opracované destičky se dále chemicky upravují mořením v lázni tak, aby došlo k lepší absorpci světla. Konečná fáze úpravy monokrystalických článků spočívá v překrytí antireflexní fólie a pokrytí po obvodu mřížkou s kontakty. Takový typ fotovoltaického článku má relativně vysokou účinnost pohybující se v rozmezí 13 – 18%. Největší účinnost článků z monokrystalického křemíku v laboratorních podmínkách je v současné době na hranici 26%.

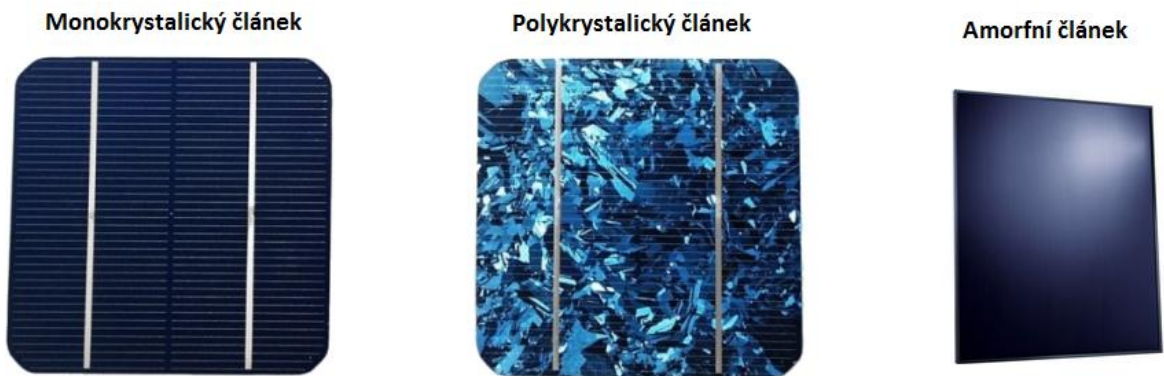
Polykrystalické články

Druhou skupinu tvoří polykrystalické články, které se vyrábějí z polykrystalického křemíku. Ten má tvar čtverce modré barvy. Pro tuto skupinu fotovoltaických článků se destičky vyrábí odlišnou metodou. V tavících kelímcích ve speciálních tavících pecích jsou křemíkové granule roztaveny a postupným ochlazováním dochází ke krystalizaci. Takto vzniklé odlitky se rozřezají na jednotlivé díly. Ty se pak dále dělí na jednotlivé destičky. Dále probíhá úprava těchto destiček jako u monokrystalických článků. Tyto články mají menší účinnost v rozmezí 12 – 14%, ale jsou ve srovnání s monokrystalickými články levnější.

Amorfní články

Tyto články se vyrábí z amorfního křemíku, tedy materiálu, v němž jsou atomy uspořádány nahodile. V důsledku deformace vazeb a rozptylu jejich energie se u amorfních polovodičů energetická mezera mezi vodivostním a valenčním pásem uplatňuje odlišným způsobem než u krystalických polovodičů. Místo termínu zakázané pásmo se používá spíše termín pohyblivostní mezera. Šířka této pohyblivostní mezery je u amorfního křemíku 1,7 eV, což je mnohem větší šířka zakázaného pásu než u krystalického křemíku, u kterého je rovna 1,12 eV. Tento rozdíl tvoří také absorbce slunečního záření, která je u krystalického křemíku od vlnové délky přibližně 1110 nm, oproti amorfnímu křemíku, kde je tato oblast posunutá až k vlnové délce 730 nm, tedy na hranici viditelné oblasti. Amorfní články jsou bez tvaré a jsou vyráběny moderní technologií nanášením tenké vrstvy křemíku do skleněného obalu nebo fólie. Oproti mono nebo polykrystalickým článkům mají malou účinnost, která je zhruba 8 – 10%. Vůči krystalickým článkům mají ale řadu výhod. Asi největší výhodou je schopnost absorbovat difúzní záření, které vzniká tříštěním přímého slunečního záření v mracích, a také o částice v atmosféře. Monokrystalické a polykrystalické články potřebují pro svou činnost přímé sluneční záření. Další výhodou je díky větší šířce zakázaného pásu, při které klesá u amorfního křemíku účinnost s teplotou pomaleji než u křemíku krystalického. Tato vlastnost se uplatňuje především při velké intenzitě slunečního záření. Dále tyto panely neobsahují letované spoje a jsou celkově lehčí. Solární články jsou při výrobním procesu souvisle mezi

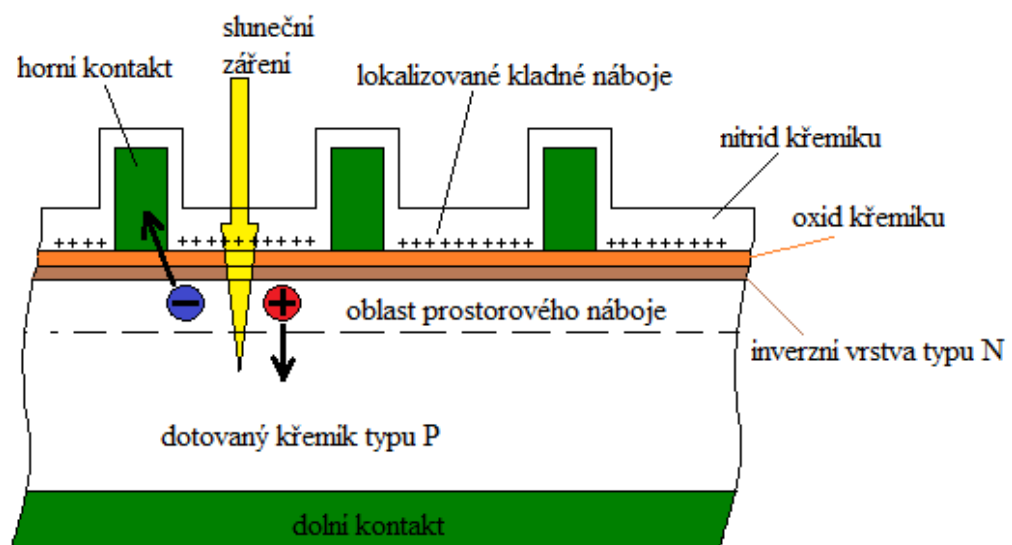
sebou pospojovány. Vyrobená elektřina je u krystalických modulů vedena prostřednictvím sběrnic od jednoho článku k dalšímu. Na mnohých místech se také u krystalických článků nachází letovaná spojení. Po letech může dojít u těchto letovaných spojení ke snížení vodivosti, a tím ke snížení výkonu fotovoltaických modulů. V krajních případech může dojít až k přerušení spoje s následkem úplného výpadku produkce elektřiny.



Obr. 1.10 – druhy fotovoltaických článků, převzato z [8]

Články typu MIS

Články s názvem MIS (Metal Insulator Semiconductor) nepracují jako běžné polovodičové diody s přechodem P-N, ale jejich P-N přechod je indukovaný. Znamená to přechod s inverzní vrstvou typu N, podobně jako u tranzistorů typu MOS. Jedná se o článek typu kov – izolátor – polovodič. Tyto články jsou vyrobeny z mono nebo polykrystalického křemíku a dosahují účinnosti až 15%. Zdá se, že tyto články dosahují optimálního kompromisu mezi vysokou účinností a nízkou výrobní cenou.



Obr. 1.11 – řez a naznačení principu MIS článku

Články z PN sloučenin

Tyto články jsou vyrobeny ze sloučenin Arsenidu galia nebo sulfidu kademnatého. O těchto sloučeninách je napsáno více v následující kapitole.

1.4 Materiály pro výrobu fotovoltaických článků

Pro fotovoltaické články lze uvažovat pouze materiály, ze kterých lze vytvořit polovodičovou strukturu. Pro polovodičovou strukturu se nejvíce používá křemík (Si), arsenid gallitý (GaAs) a sulfid kademnatý (CdS).

Křemík

První fotovoltaické články byly vyrobeny z křemíku, který zůstal i v současné době nejvýznamnějším materiálem pro tento účel. Jako materiál pro tyto články má nejdelší historii a nejrozsáhlejší technologickou základnu. První fotovoltaické články byly na bázi monokrystalického křemíku a dosahovaly účinnosti 6%. Křemíkové fotovoltaické články však nejsou tvořeny čistým křemíkem, ale jedná se o tzv. křemíkové diody. Do základního materiálu se v nepatrném množství přimísí cizí atomy (Al, Bo), kterým k zabudování do krystalické mřížky chybí jeden valenční elektron. Jedná se o dotování typu P. Nebo se může vytvořit dotace typu N, tak že do tenké vrstvy na lícni straně jsou difúzním principem zavedeny cizí atomy, které mají o jeden valenční elektron více (Ph, As). Pro výrobu fotovoltaických článků se využívá monokrystalický, polykrystalický nebo amorfni křemík. Záleží při tom na druhu článku. Polykrystalický křemík je vhodné použít pro články s menšími výkony a jeho výhodou je poměrně dobrá účinnost i při nižší intenzitě osvětlení. Monokrystalický křemík je vhodnější pro větší výkony, ale potřebuje dostatečnou intenzitu osvětlení, při které má větší účinnost než polykrystalický. Amorfni křemík má také řadu výhod. Má například nižší teplotní součinitel výkonu, to znamená, že jeho účinnost s rostoucí teplotou klesá podstatně pomaleji než u krystalického křemíku. V letních měsících je tedy z amorfni modulů lepší výtěžnost. Amorfni křemík je také technologií vhodnou na místa, kde není možné splnit požadavek optimální orientace fotovoltaického systému, tedy v případech, kdy nejsou moduly orientovány ideálně na jih. Křemík musí být pro výrobu fotovoltaických článků velice čistý. Proces čištění je ale velice drahý a způsobuje vysokou cenu těchto článků. Nečistoty v křemíku způsobují snížení účinnosti a tím i výkonu. Lze také použít tzv. špinavý křemík, ale i ten se musí vhodně upravit, aby nečistoty v něm nebyly rozptýlené po celém objemu. Postup pro využití tohoto špinavého křemíku se zakládá na tom, že nečistá křemíková tavenina se ochlazuje velice pomalu a tím se docílí, že nečistoty vykrystalizují ve

větších kusech a nejsou roztroušeny tak hustě po objemu. Tento postup umožňuje lepší průchod elektronů a fotonů uvnitř této struktury. Při pomalém ochlazování také vznikají větší krystaly křemíku, čímž se také zvyšuje účinnost. Křemíkové články nejvíce využívají spektrum světla směrem k modré barvě.

Arsenid galia

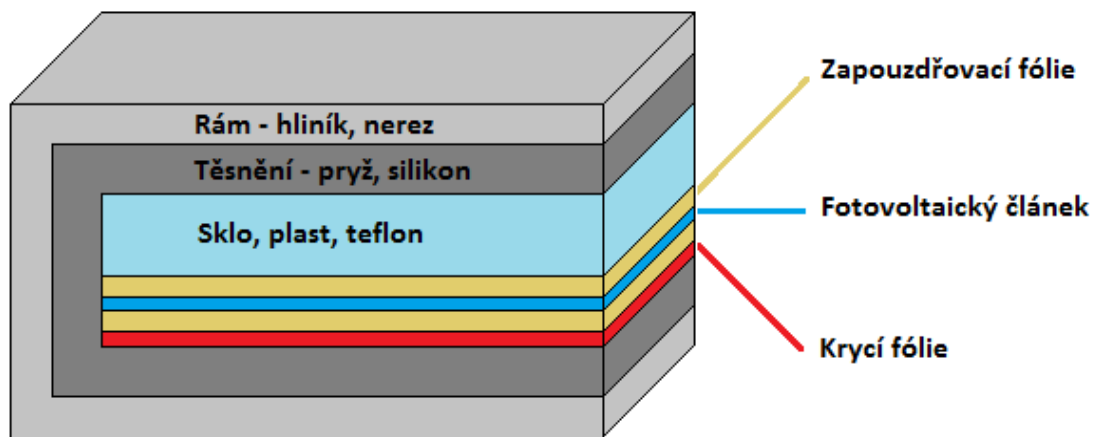
Druhým nejčastějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je arsenid galia (GaAs). Jedná se o sloučeninu gallia a arsenu, která má velkou výhodu v účinnosti přeměny světla, která dosahuje až 20 procent. Články vytvořené z této sloučeniny mají zároveň vysokou odolnost proti tvrdému kosmickému záření. Další výhodou je, že při vyšších teplotách kolem 100 stupňů Celsia pracují bezproblémově a neztrácejí svůj výkon. Nevýhodou této sloučeniny je její vysoká cena a také vyšší hustota ($5\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) oproti krystalickému křemíku ($2\,330\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), takže z hlediska měrného výkonu články z GaAs nikterak nevynikají v porovnání s křemíkovými. Jsou také podstatně křehčí. Ve srovnání s křemíkem využívají tyto články oblast světelného spektra směrem k červené barvě. V současnosti se provádí vývoj kombinace článků GaAs a křemíkových. Kombinace obou materiálů by totiž měla vést k vyšší účinnosti a to zejména z toho důvodu, že oba materiály mají rozdílnou spektrální citlivost. Vhodnou kombinací obou typů článků, případně použitím germania místo křemíku, lze dosáhnout účinnosti až 30%. Ve spojení s koncentrátory se v budoucnu očekává dokonce účinnost až k 40%.

Sulfid kademnatý

Tato anorganická sloučenina síry a kadmia s chemickým vzorcem CdS je zástupcem historicky nejstaršího materiálu pro výrobu fotovoltaických článků. Vytváří P-N přechod se dvěma dalšími materiály. Jedná se o sulfid měďnatý nebo telurid kademnatý. Články Cu_2S – CdS mají výhodu ve své nižší hmotnosti, díky které se používali především v kosmických aplikacích. Nevýhodou je jejich nízká stabilita a také účinnost kolem 10%. Dnes se již prakticky nepoužívají. Články s přechodem CdS – CdTe jsou pokročilejší variantou. Vznikají vytvořením heteropřechodu, který vznikne spojením P-typového CdTe a N-typového CdS. Polovodičová sloučenina CdTe má šířku zakázaného pásu 1,56 eV. Použití této sloučeniny je velice výhodné, protože této energii odpovídá ve slunečním spektru maximum energie. Nevýhodou je, že tyto články vyhovují jen zařízením, které mají nízký příkon, a proto se v energetice příliš nepoužívají. Sulfid a také selenid kademnatý se v dnešní době nejvíce využívají při výrobě fotorezistorů citlivých ve viditelné a krátkovlnné infračervené oblasti.

Konstrukční materiály panelu

Tuto skupinu tvoří materiály, ze kterých je konstruován samotný fotovoltaický panel. Hotové a propojené fotovoltaické články, které jsou zalaminované ve skle nebo v plastu jsou před vlastní montáží vleповány do hliníkových ráků. Tento hliníkový či nerezový rám je zakryt čirým sklem na čelní straně. Používají se zde také silikonové materiály pro lepení článků do rámu. Kvalitní průmyslové silikony vytvářejí v tomto směru velmi spolehlivý, pevný a pružný spoj, který je velmi odolný vlivům prostředí. Široce užívaným polymerem pro krytí článku mezi svrchní skleněnou deskou a spodním skleněným nebo plastovým krytem je etylen vinyl acetát. Ten se používá hlavně z důvodu své odolnosti proti korozi, čirosti a samozhášivým vlastnostem.

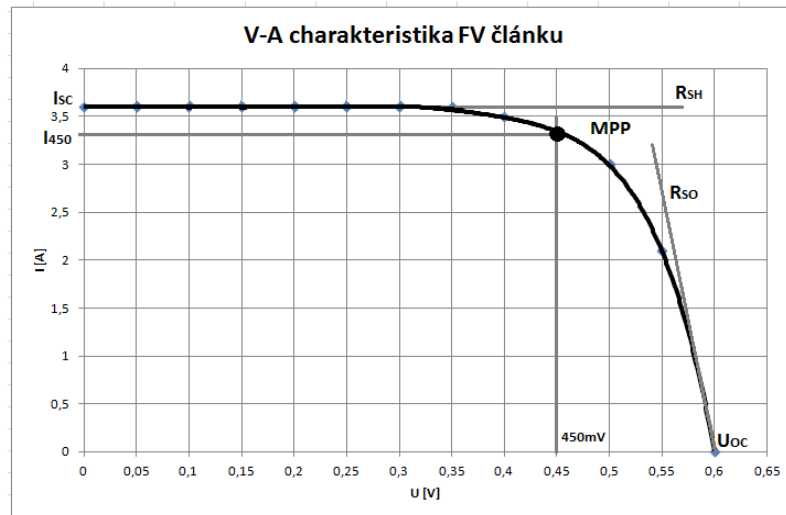


Obr. 1.12 – řez fotovoltaickým panelem

1.5 Parametry fotovoltaických článků

Aby bylo možné určit jednotlivé parametry fotovoltaických článků, nahrazuje se většinou takový článek souborem jednotlivých prvků, které lze snadno a jednoduše popsat.

Pro popis fotovoltaických článků se používá voltampérová charakteristika, která nám udává závislost proudu na napětí. V této charakteristice se pak vyznačují určité důležité body, které se používají při posuzování kvality těchto článků a při návrzích fotovoltaických systémů. Většina parametrů charakterizující fotovoltaický článek se udává v katalogu, ale některé další parametry musíme již změřit nebo určit z voltampérové charakteristiky. Příklad takové voltampérové charakteristiky ukazuje obrázek 1.13. Jsou zde zároveň vyznačeny základní parametry.

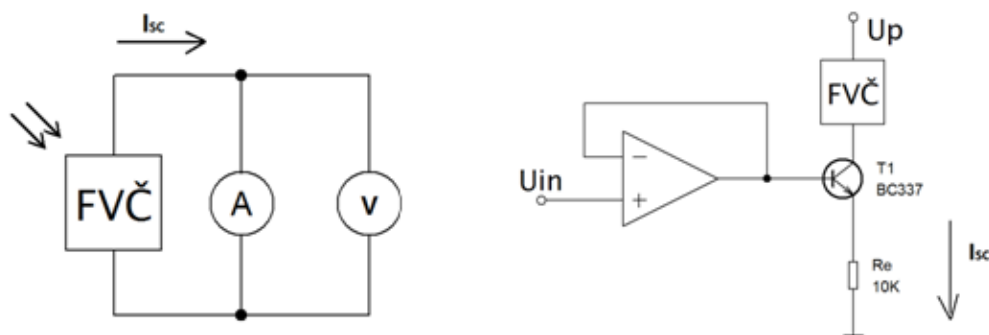


Obr. 1.13 – V-A charakteristika fotovoltaického článku

Základní parametry fotovoltaických článků

Proud nakrátko – I_{SC} – (short circuit)

Tento parametr se nazývá též fotoelektrický nebo zkratový proud. Je to charakteristická hodnota, která se vyznačuje ve V-A charakteristice fotovoltaických článků. Pohybuje se většinou v rozmezí desítek mA až několika jednotek A. Fyzikálně se jedná o maximální proud, který může článek při daném slunečním osvětlení dodávat. Velikost tohoto proudu závisí na intenzitě osvětlení, teplotě, spektrální citlivosti a ploše fotovoltaického článku. U největších běžně dostupných článků se pohybuje tento proud okolo 6 A při plném osvětlení. Pokud chceme tento proud určit přímo, nestačí nám pouze tuto hodnotu odečíst z V-A charakteristiky, ale potřebujeme k tomu speciální přístroj. Běžné ampérmetry mívají totiž vnitřní odpor kolem 100 miliohmů a napětí na článku při měření takovým ampérmetrem může být kolem 300 mV. Na obrázku 1.14 vlevo je naznačeno zapojení měřicích přístrojů pro měření proudu nakrátko. Vpravo je nakresleno schéma zapojení přípravku pro měření proudu nakrátko za použití speciálního přípravku. Tento přípravek využívá vlastnosti tranzistoru T1 jako zdroje konstantního proudu za kolenem jeho výstupní V-A charakteristiky.



Obr. 1.14 – schéma pro měření proudu nakrátko

Napětí naprázdno – U_{OC} – (open circuit)

Určuje nám velikost napětí na svorkách článku bez připojené zátěže. Toto napětí je maximální napětí fotovoltaického článku při dané teplotě a intenzitě osvětlení.

Pracovní bod – PB

Tento bod lze snadno najít na V-A charakteristice a ukazuje nám, kde zrovna fotovoltaický článek pracuje při daném napětí a proudu. Poloha pracovního bodu je závislá na vlastnostech odběru napětí a proudu daného článku a také silně závislá na teplotě. Při provozu v oblastech, kde se teplota vzduchu pohybuje kolem 40 °C a zhoršených podmínkách chlazení článku (bezvětrí), dochází ke zvýšení povrchové teploty článku až na 80 °C. Při takto vysokých teplotách dochází ke změnám elektrických vlastností, které vedou ke snížení svorkového napětí článku na zatěžovací charakteristice. Pokles svorkového napětí způsobí snížení dodávaného výkonu do zátěže. Jelikož k tomuto jevu dochází právě při největší sluneční intenzitě, můžeme ztratit například až 75% z dosažitelné denní výroby energie tohoto článku. V oblastech s touto sluneční aktivitou a vysokou teplotou se používá kompenzační metoda založená na principu řízení optimálního odporu zátěže. Zpravidla se snažíme docílit toho, aby byla poloha pracovního bodu totožná s polohou bodu maximálního výkonu článku (viz následující parametr). Leží-li poloha pracovního bodu v režimu nakrátko nebo naprázdno neodevzdává fotovoltaický článek žádný výkon. Polohu pracovního bodu určují tyto dva režimy:

- a) článek pracuje do obecné zátěže, tudíž poloha PB je dána odporem zátěže
- b) článek pracuje do akumulátoru, tzv. nabíjecí režim, tedy poloha PB je dána napětím akumulátoru

Maximální výkon – MPP – maximal power point

Tento údaj nám udává maximální výkon článku. Bod maximálního výkonu fotovoltaického článku bývá vyznačen na V-A charakteristice zhruba uprostřed ohybu. Zařízení, odebírající energii z fotovoltaického článku, by mělo zatěžovat tento článek takovým způsobem, aby pracoval právě v okolí bodu maximálního výkonu. Jen tak může článek využít sluneční energii optimálně. Typické články o velikosti 100 x 100 mm dosahují maximálního výkonu od 1,5 do 3 W. Bod MPP se udává prostřednictvím napěťové a proudové souřadnice na V-A charakteristice. Jedná se většinou o okolí proudu, při němž je napětí na článku rovno 450 mV. Rovněž se může pomocí tohoto maximálního výkonu zjistit vnitřní odpor (R_m) článku z rovnice

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad [\Omega], \text{ kde} \quad (\text{R 1.1})$$

U_m – napětí, při kterém dodává fotovoltaický článek maximální výkon

I_m – proud, při kterém dodává fotovoltaický článek maximální výkon

Proud I_{450}

Tento proud protéká článkem při napětí 450 mV. Porovnáme-li polohu MPP na V-A charakteristice se souřadnicemi napětí 450 mV a proudu I_{450} dojdeme k závěru, že proud I_{450} je měřen proto, aby bylo možno lépe určit nebo odhadnout polohu MPP.

Fill factor – FF

Tento parametr fotovoltaických článků udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem, který je dán napětím naprázdno a proudem nakrátko. Tento faktor je závislý na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy. Tento poměr se uvádí jako tzv. „činitel naplnění“ a je definován takto

$$FF = \frac{U_m * I_m}{U_{OC} * I_{SC}} = \eta_{el} \quad , \text{ kde} \quad (\text{R 1.2})$$

U_{OC} – napětí naprázdno

I_{SC} – proud nakrátko

η_{el} – elektrická účinnost

Tento činitel by se v ideálním případě měl rovnat jedné. V reálném případě je samozřejmě tento faktor a tudíž i elektrická účinnost menší. Podle velikosti můžeme usoudit, jak kvalitní je příslušný článek. Čím je jeho hodnota větší, tím větší výkon je schopen do zátěže dodat.

Účinnost fotovoltaického článku – EEF

Udává nám účinnost přeměny sluneční energie v podobě světelného záření na energii elektrickou. Tento parametr je dán vlastnostmi materiálu, ze kterého je článek vyroben. Materiál ovlivňuje spektrální citlivost článku dopadajícího světelného záření. Monokrystalické články mají účinnost v rozmezí 15 – 18%, polykrystalické 13 – 16%.

Účinnost fotovoltaického článku se spočítá podle následujícího vztahu

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{E * A_C} \quad , \text{ kde} \quad (\text{R 1.3})$$

P_m – maximální výkon, který může článek dodat

P_{rad} – výkon dopadajícího záření

E – intenzita osvětlení

A_C – plocha fotovoltaického článku

Kvantová účinnost

Tato veličina se udává spíše u optických polovodičových součástek, kde udává jejich účinnost. V praxi se s údajem o kvantové účinnosti setkáváme nejčastěji u CCD prvků nebo u kvalitních fotodiod, kde tato veličina udává schopnost přeměny dopadajícího záření o určité vlnové délce na elektrický proud. Pomocí kvantové účinnosti může být také popsána kvalita laseru, kde se naopak mění elektrický proud na záření.

Sériový (R_{SO}) a paralelní (R_{SH}) odpor článku

Velikosti těchto odporů nám udávají kvalitu fotovoltaického článku. Velká hodnota sériového odporu R_{SO} způsobuje, že svorkové napětí článku bude tím menší, čím bude větší úbytek napětí na sériovém odporu. Naopak příliš nízká hodnota paralelního odporu R_{SH} nás informuje o vadném článku. Tento článek se chová jako by byl zevnitř zkratován. Vliv sériového a paralelního odporu je možné pozorovat na obrázku 1.13. Obě tyto hodnoty určují sklon V-A charakteristiky. Z daného obrázku je zcela patrné, že paralelní odpor R_{SH} je tečnou na zkratový proud I_{SC} , zatímco sériový odpor R_{SO} je tečnou na napětí naprázdno U_{OC} .

Difúzní kapacita fotovoltaického článku

Hodnota napětí na P-N přechodu kolísá v malém intervalu kolem střední hodnoty napětí vlivem malé střídavé složky napětí a způsobí tím snížení nebo zvýšení výšky potenciálové bariéry P-N přechodu. Tato malá změna napětí na P-N přechodu vede k tomu, že se změní celkový elektrický náboj vstříkovaný z jedné oblasti P-N přechodu do druhé. Změna náboje vyvolaná změnou napětí je podle obecné definice kapacitou. Jedná-li se v tomto případě o převážně difúzní charakter proudu P-N přechodu, je tato kapacita nazývána difúzní. Difúzní kapacita je silně závislá na době života nosičů τ a velikosti stejnosměrného proudu.

Bariérová kapacita fotovoltaického článku

Druhou kapacitní vlastností P-N přechodů a tedy i fotovoltaických článků je tzv. bariérová kapacita. Bariérová kapacita P-N přechodu je velmi výrazná v závěrném směru a může velmi ovlivnit dynamické vlastnosti přechodu a tím i celého článku. Tato kapacita je závislá na přiloženém napětí v závěrném směru. Určí se pomocí napěťových impulzů v propustném směru. Napěťový puls pro určení hodnoty bariérové kapacity musí být řádově v desítkách milivoltů, aby časovou konstantu vybíjení neovlivňovala rekombinace minoritních nosičů náboje.

Průrazné napětí v závěrném směru

Je to velikost napětí, při kterém dojde v závěrném směru k nárůstu proudu. U každého fotovoltaického článku bývá hodnota napětí, kdy dojde k průrazu, různá. Velikost průrazného napětí je závislá na tzv. depletiční vrstvě. Depletiční vrstva je oblast v okolí P-N přechodu, ve které majoritní nosiče náboje difundují na druhou stranu P-N přechodu, kde jsou minoritními nositeli náboje a rekombinují. Tímto procesem se v okolí přechodu vytvoří oblast, kde se nevyskytují volní nositelé náboje. Rozložení průrazu po celém polovodičovém přechodu je dáno rozdělením příměsí a geometrií přechodu. U fotovoltaických článků jsou obvykle defekty, které ovlivňují rozložení závěrného proudu a především způsobují jeho značné zvýšení. Pro stanovení velikosti limitace průrazného napětí je třeba poměrně velkého proudu. Například pro článek s rozměry 100 x 100 mm jde o proud i víc jak 10 A. Při tak velkém závěrném proudu může dojít k tepelnému průrazu, a tím pádem i k destrukci. Pokud je ale použit proudový puls s dostatečně krátkou periodou, tepelné zatížení se velmi sníží. Pro toto měření je zapotřebí impulzního zdroje se špičkovým proudem až 15 A a maximálním napětím až 50 V.

1.6 Matematický model fotovoltaického článku

Abychom mohli určit jednotlivé parametry fotovoltaického článku, je vhodné tento článek nahradit modelem jednoduchých částí, které lze snadno popsat a jejichž principy jsou dobře známé. Jedná se o analytický popis fotovoltaického článku z hlediska jeho principu. Pokud máme takový model k dispozici, můžeme s ním provádět řadu testů a analýz bez potřeby zkoumaného článku. Jedná se o šetrnou metodu testování bez rizika jeho poškození, což vede také ke snížení nákladů. Pro toto testování musíme mít co nejvíce informací a údajů, které co nejlépe daný článek popisují. V praxi se běžně tyto informace nachází v katalozích nebo vycházíme z údajů, které jsme získali jejich měřením. Nejjednodušeji lze matematicky popsat fotovoltaický článek jako polovodičovou diodu. Vycházíme zde ze vztahu pro Shockleyho rovnici

$$I = I_0 * \left[\exp\left(\frac{U}{U_t}\right) - 1 \right] - I_L, \text{ kde} \quad (\text{R 1.4})$$

I – proud protékající fotodiodou

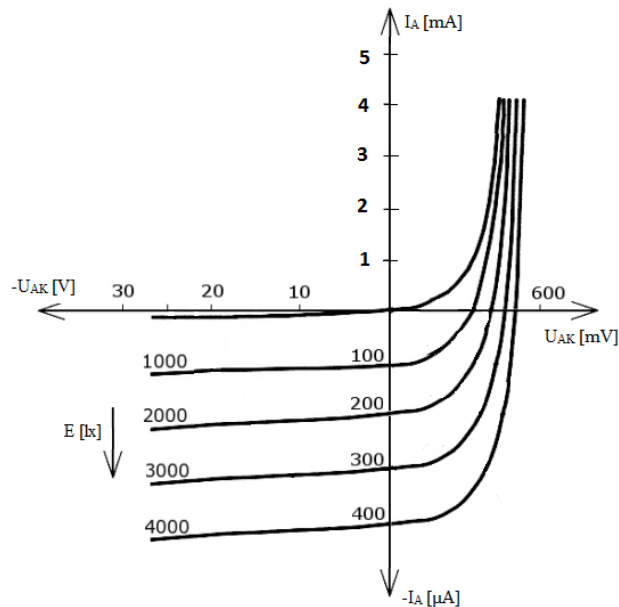
I_0 – proud v závěrném směru

U – napětí na fotodiodě

U_t – teplotní napětí

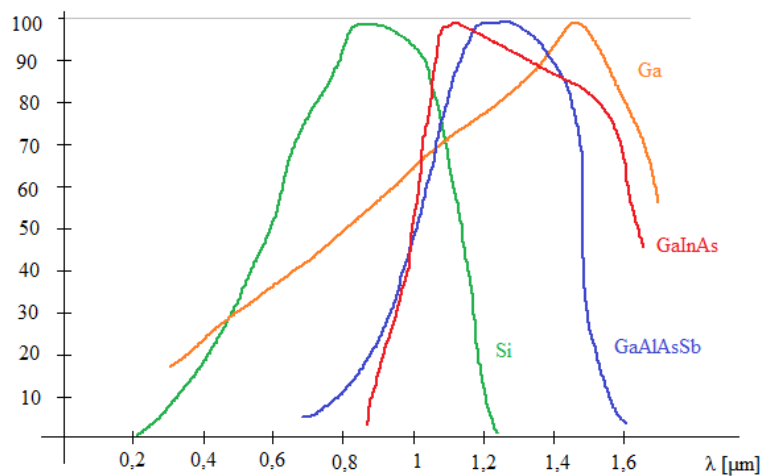
I_L – fotoproud úměrný intenzitě osvětlení

Matematický vztah, který je uveden v rovnici (R 1.4), vyjadřuje zvětšování závěrného proudu s intenzitou osvětlení, která je u solárních článků nejčastěji zastoupena slunečním zářením. Vliv osvětlení přechodu můžeme sledovat v polarizaci diody v závěrném směru, kdy dochází k lineárnímu růstu anodového proudu při rovnoměrném zvětšování osvětlení. Dioda se tedy chová jako pasivní součástka, jejíž elektrický odpor v závěrném směru je závislý na osvětlení. Toto také vyjadřuje následující V-A charakteristika.



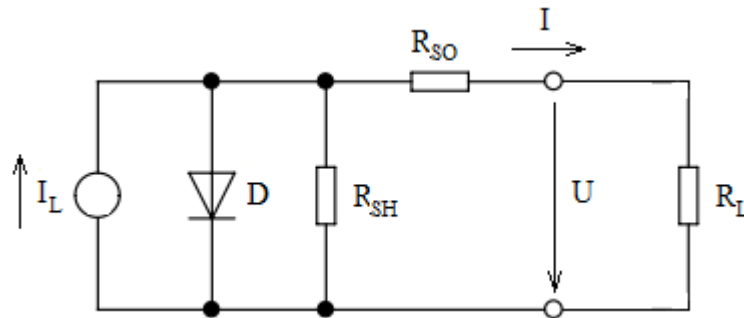
Obr. 1.15 – V-A charakteristika obecné fotodiody

Při výrobě fotodiod se nejvíce uplatňují polovodičové materiály, jako je křemík, germanium, selen a různé další sloučeniny např. GaAs, GaInAs, GaAlAsSb. Fotodiody vyrobené z těchto materiálů mají odlišné spektrální charakteristiky. Relativní citlivost je znázorněna jako závislost na vlnové délce dopadajícího monochromatického záření.



Obr. 1.16 – příklady spektrálních charakteristik fotodiod podle použitého materiálu

Mezi základní parametry fotodiod patří jejich velká světelná citlivost, malý proud za temna, velká zatížitelnost a dlouhodobá stálost. Nevýhodou fotodiod je jejich velká citlivost na vlhkost, proto musí být dobře zapouzdřeny. Mezní kmitočty použití jsou obvykle nižší než 100 kHz a jejich vlastnosti se výrazně mění vlivem teploty. Přibližný rozsah pracovních teplot je zhruba od -30 do +90 °C. Ideální fotovoltaický článek lze namodelovat náhradním schématem na obrázku 1.17.



Obr. 1.17 – náhradní schéma fotovoltaického článku

I – výstupní proud

I_L – zdroj proudu závislý na intenzitě osvětlení

D – polovodičová dioda

R_{SO} – sériový odpor fotočlánku

R_{SH} – paralelní odpor fotočlánku

R_L – zátěž

Výstupní proud fotovoltaického článku I je dán vztahem

$$I = I_L - I_D \cdot \left[\exp\left(\frac{U + I \cdot R_{SO}}{k_B \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_{SO}}{R_{SH}}, \text{ kde} \quad (\text{R 1.5})$$

k_B – Boltzmannova konstanta

I_D – proud diodou

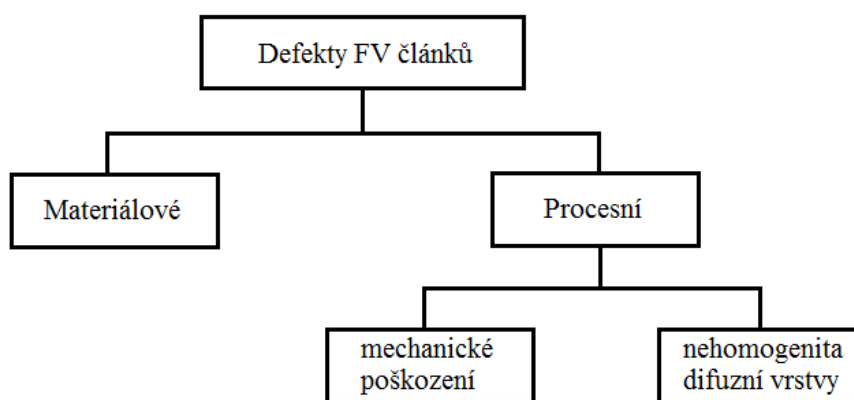
T – teplota

Z výše uvedeného vztahu je patrné, že pro sestavení matematického modelu je třeba k dispozici celou řadu parametrů fotočlánku, které ale většinou nemáme k dispozici. Tyto parametry se musí buď změřit, nebo některé z nich přibližně odhadnout z V-A charakteristiky.

2 ZÁKLADNÍ METODY TESTOVÁNÍ A ZKOUŠENÍ FV ČLÁNKŮ

2.1 Defekty fotovoltaických článků

Z hlediska metod testování a zkoušení fotovoltaických článků je důležité znát jejich defekty a příčiny. Defekt neboli porucha, jakožto vnější veličina zařízení s neznámou vnitřní strukturou, je možno definovat jako odchylku z vymezeného intervalu požadovaných vlastností. Pokud chceme zjistit, jestli zařízení pracuje správně, je nutné znát vlastnosti tohoto zařízení, abychom s ním mohli porovnat ostatní zařízení a správně posoudit jejich případné odchylky.



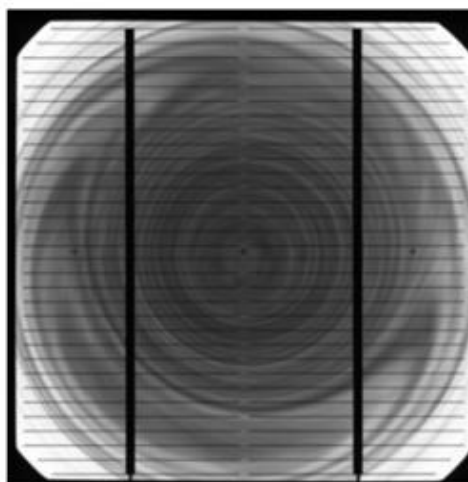
Obr. 2.1 – základní rozdělení defektů FV článků

Defekty lze rozdělit do dvou skupin podle jejich vzniku. Jedná se o materiálové a procesní defekty. Materiálové defekty (Grow Defects) vznikají již při výrobě samotného křemíku, použitého pro výrobu fotovoltaických článků. Patří mezi ně hlavně vírový defekt a vnitřní pnutí materiálu. Procesní defekty (Processing Induced Defects) vznikají při technologickém zpracování křemíku pro fotovoltaický článek. Dělí se na mechanické poškození a nehomogenitu difúzní vrstvy. Tyto defekty způsobují zhoršení elektrických vlastností krystalických křemíkových fotovoltaických článků. Je třeba je včas lokalizovat a v technologickém procesu zabránit jejich vzniku. Pro testování a zkoušení fotovoltaických článků se používají různé metody.

Vírový defekt (Swirl Defect)

Patří mezi nejrozšířenější materiálový defekt. Jedná se o vadu, jejímž charakteristickým rysem jsou oblasti generující nižší fotoelektrický proud, které jsou uspořádané do soustředných kružnic. Tyto kružnice vznikají již při tažení monokrystalického křemíku z důvodu vnikání příměsí, nejčastěji kyslíku, do křemenného ingotu při rotačním

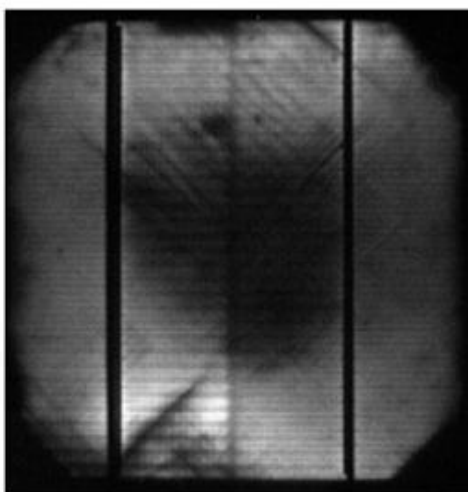
pohybu při zpracování. Úrovní koncentrace kyslíku a stupněm jeho precipitace v SiO_2 lze ovládat i celkovou hustotu těchto vrstevných chyb. Regulací rychlosti tažení lze nežádoucí kyslík přesunout na okraj křemíkového ingotu a ten se poté odstříhne. Pokud se tyto kružnice vyskytují při testování fotovoltaických článků, znamená to, že se jedná o umístění molekul kyslíku v P-typu křemíkového polovodiče. Foton, který dopadá na P-N přechod článku vytvoří pár elektron – díra. Část takto vytvořených elektronů a děr se poté může rekombinovat na kyslíkových příměsích a dojde tak ke snížení celkového počtu nosičů elektrického proudu. Nadbytečná energie, která při tomto procesu vznikne, se vyzáří do prostoru ve formě tepla, čímž dochází ke snížení účinnosti článku.



Obr. 2.2 – zobrazení vírového defektu, převzato z [15]

Vnitřní pnutí materiálu

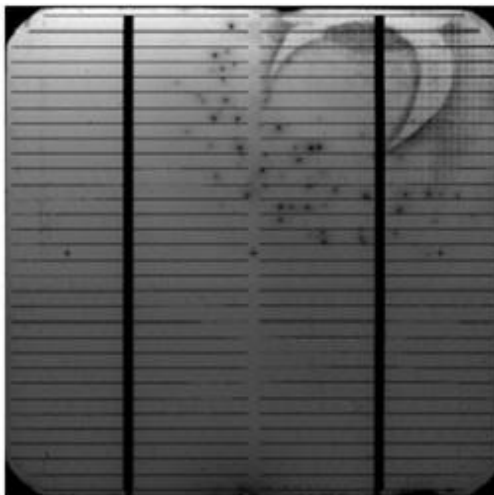
Tento defekt vzniká také při výrobě křemíkového ingotu. Je typický pro špatně řízený proces výroby monokrystalického křemíku, který se provádí nejčastěji Czochralského metodou.



Obr. 2.3 – zobrazení defektu vnitřního pnutí materiálu, převzato z [15]

Nehomogenita difuzní vrstvy

Tato nehomogenita vzniká vnikajícími nečistotami během procesu difúze. Na obrázku 2.4 je tato vada dobře vidět v podobě černých teček. Dá se odhalit metodou LBIC a také metodou detekce vad při záření mikroplazmy.



Obr. 2.4 – zobrazení defektu nehomogenity difúzní vrstvy, převzato z [15]

Mechanické poškození

Do této skupiny defektů fotovoltaických článků patří především poškrábání, okrajové odštípnutí, neobroušené hrany, které způsobují zkrat přední a zadní strany, chyba metalizace, skrytý lom, vnik prachových částic a další. Nejčastěji dochází k mechanickému poškození při špatné manipulaci s fotovoltaickým článkem, zejména při zasouvání jednotlivých článků do zásobníku ve výrobě nebo při manipulaci s článkem při závěrečné diagnostice. Při poškrábání dochází ke zhmoždění vrchní vrstvy fotovoltaického článku. V místě poškrábání může dojít k narušení přechodu P-N a k mikroskopickému lavinovitému průrazu. Tento defekt je dobře pozorovatelný metodou LBIC nebo elektroluminiscence.



Obr. 2.5 – zobrazení defektů (zleva) poškrábání, výskytu prachových částic a skrytého lomu, převzato z [15]

2.2 Metody testování a zkoušení fotovoltaických článků

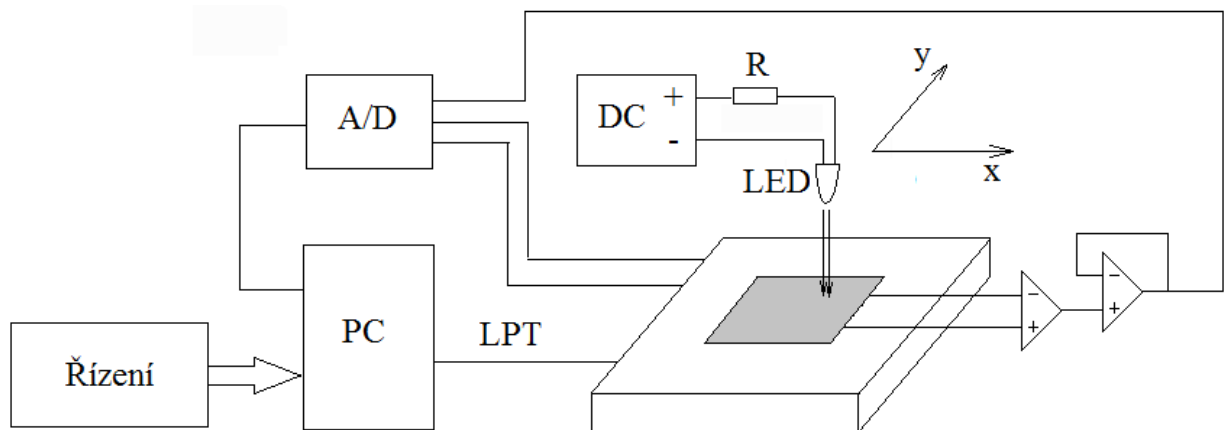
Testování fotovoltaických článků je významnou součástí výrobního procesu, výzkumu i vývoje. Diagnostické metody mají odhalit co největší počet defektů a dopomoci k jejich včasnému zjištění. Pro testování a zkoušení fotovoltaických článků existuje více metod.

Základní rozdělení je na metody měření elektrických parametrů a na metody optické diagnostiky. Do první zmíněné skupiny patří metody testující elektrické parametry fotovoltaického článku, např. sluneční simulátor s testerem, měření kapacit, měření V-A charakteristik, dynamické měření, šumové charakteristiky, a jiné další. Do druhé skupiny patří metody detekující defekt pomocí světla v ploše solárního článku, využívající vizuální zobrazení výsledků. Nejčastěji se tyto metody detekce lokálních defektů označují pod zkratkou LBI (Light Beam Induced). Techniku testování LBI rozdělujeme podle hlavní měřené veličiny na metody LBIC (Light Beam Induced Current), LBIV (Light Beam Induced Voltage), LBIP (Light Beam Induced Power), EBIC (Electron beam induced current), elektroluminiscence, fotoluminiscence a jiné. Tato technika zkoumá povrch fotovoltaických článků. Pomocí světelného paprsku se skenuje povrch článku a pomocí měřicího signálového zesilovače jsou data zaznamenána do počítače. Z naměřených dat se poté sestaví mapa odezvy měřeného článku na světelný paprsek.

Metoda testování LBIC

Používá se pro zjištění lokálních defektů fotovoltaických článků nejčastěji. Touto metodou lze určit plošné rozložení fotoproudu na fotovoltaickém krystalickém článku. Spektrum světelného zdroje zapříčiňuje různou hloubku vniku světelného záření, která ovlivňuje velikost fotoproudu. Tento fotoproud se měří a pomocí převodníku se převádí na proudovou odezvu. Metoda LBIC je tedy založena na rastrování povrchu fotovoltaického článku zaostřeným světelným svazkem monochromatického světla o různé vlnové délce. Jako zdroje světla se používají LED diody nebo také lasery o různých vlnových délkách pro odhalení odlišných typů defektů. Více vlnových délek se používá pro odhalování defektů v různých hloubkách fotovoltaického článku. Defekty povrchové se většinou pozorují při krátkých vlnových délkách, zhruba v rozmezí 400 – 470 nm. Oblast přechodu je pak dobře pozorovatelná při vlnových délkách blízko 525 nm. Pro zkoumání oblastí defektů v základním materiálu je vhodné použít světelný svazek s vlnovou délkou 630 nebo 890 nm. Samotná metoda testování pomocí LBIC spočívá v pohybu laseru nebo LED diody umístěné těsně nad povrchem článku tak, aby paprsek z diody či laseru byl zaostřen na vzorek a díky lokální odezvě z článku je získán sken neboli rastr. Pokud je osvětleno místo s defektem,

výstupní proud článku výrazně poklesne. Získaný rastr se uspořádá do tzv. proudové mapy a modeluje chování celého článku v jeho jednotlivých částech. Tímto způsobem lze lokalizovat především zkratky a některé strukturální poruchy. Přesnost proudových map závisí především na druhu použitého zdroje světla, tedy na hloubce vniku a na velikosti kroku a zaostření s jakým je daný vzorek analyzován. Tato metoda je proto poměrně zdoluhavá a měření může trvat i několik hodin v závislosti na přesnosti analýzy. Pro měření pomocí metody LBIC postačuje, aby byl zátěžový odpor měřicího převodníku menší než polovina ideální zátěže při maximálním výkonu. Pro praktické měření to znamená hodnotu odporu menší než $0,1 \Omega$.



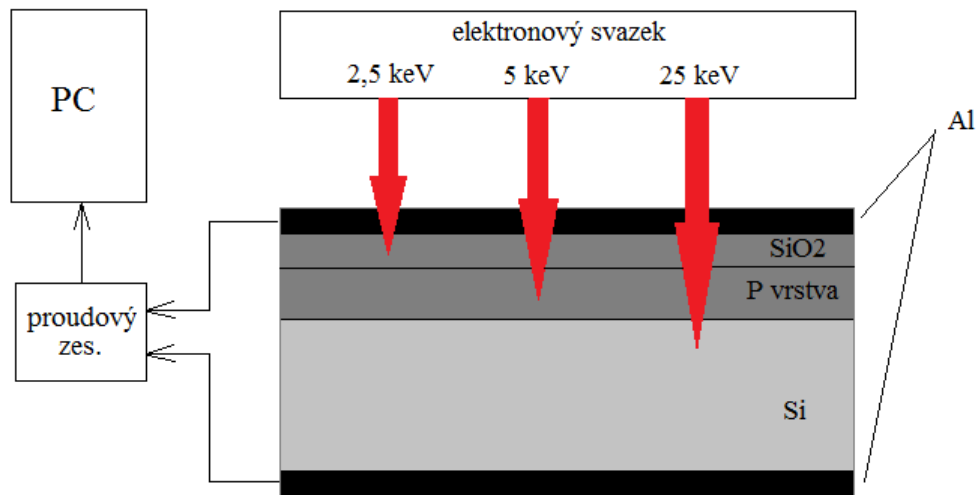
Obr. 2.6 – základní schéma zapojení měřící metody LBIC

Metoda testování LBIV

Tato metoda slouží rovněž ke zjišťování defektů fotovoltaických článků a je také založena na rastrování povrchu fotovoltaického článku zaostřeným světelným svazkem monochromatického světla. Při této metodě není vybuzen proud, nýbrž napětí a výsledkem je tudíž napěťová mapa. Rozdíl oproti metodě LBIC je tedy pouze v měřené veličině. Při tomto měření je požadován vnitřní odpor měřicího zesilovače co nejvyšší. Tuto podmínku splňuje většina měřicích zařízení pro měření napětí, proto realizace metody LBIV není tak technicky náročná jako nastavení pracovního bodu u metody LBIC.

Metoda testování EBIC

Tato metoda slouží k vyhodnocování kvality polovodiče, zachycuje v nich skryté přechody a vady. Používá se k tomu elektronový rastrovací mikroskop, který díky rozlišovacím možnostem umožňuje zkoumání na atomární úrovni, rychlost rekombinace nosičů nebo lze pomocí této metody stanovit difúzní délku minoritních nosičů.

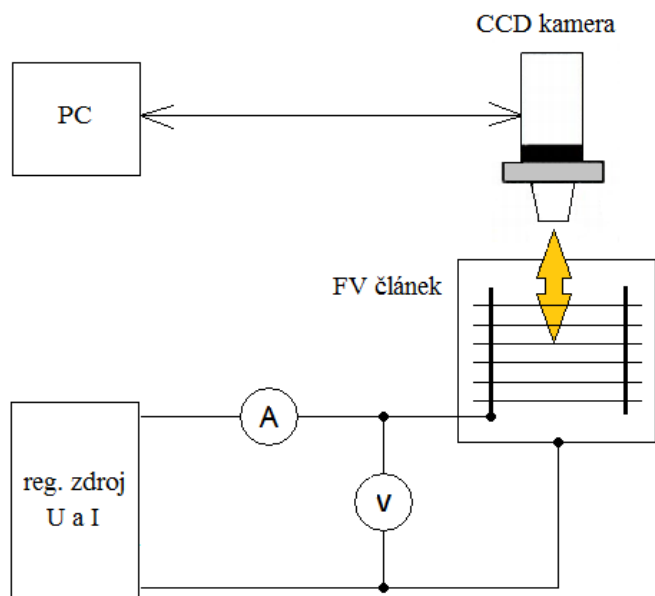


Obr. 2.7 – základ měřící metody EBIC

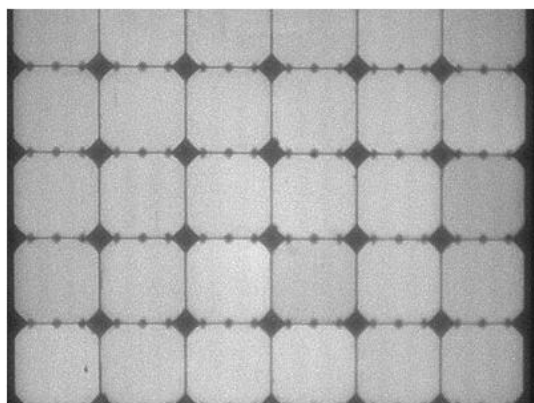
Metoda elektroluminiscence

Tato testovací metoda je založena na fyzikálním ději, kdy při průchodu elektrickým proudem polovodičovým přechodem dochází k emitování světelného záření. Polovodiče lze rozdělit na polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem a s nepřímým mezipásmovým přechodem. Do skupiny polovodičů s přímým mezipásmovým přechodem patří např. GaAs. U této sloučeniny dochází při rekombinaci páru elektron – díra k vysoké pravděpodobnosti vyzáření fotonu o energii rovnající se šířce zakázaného pásu v místě přímého přechodu. Těto vlastnosti se nejvíce využívá u LED diod a polovodičových laserů. U polovodičů s nepřímým mezipásmovým přechodem se účastní při generačně – rekombinačních dějích kromě energie fotonů i tzv. fonony. Tato skupina ale není příliš vhodná pro optoelektroniku, protože je pravděpodobnost vyzáření fotonu při rekombinačních dějích u těchto polovodičů nižší a je tu větší neurčitost energie vyzářeného fotonu. Tuto skupinu polovodičů lze použít pro generování světelné emise a pomocí ní analyzovat struktury polovodičových P-N přechodů, jako jsou fotovoltaické články. Metoda elektroluminiscence umožňuje detekci materiálových a procesních defektů fotovoltaického článku. Je to velmi rychlá a přesná metoda pro mapování prostorového rozložení, které poskytuje informace o elektrických, optických a materiálních vlastnostech článku. Na rozdíl od metod LBIC nebo LBIV, kde dochází k mapování článku bod po bodu, u této metody dochází k zachycení celé proudové mapy najednou pomocí komerčně dostupné CCD kamery. Elektroluminiscenční mapa článku lze získat během několika vteřinové expozice. Během měření je článek připojen ke zdroji napětí v propustném směru. Detekce defektů a rozložení proudu ze snímku využívá převážně šedou stupnici zobrazení a spočívá v rozlišení tmavých a světlých míst na tomto článku. Místa s

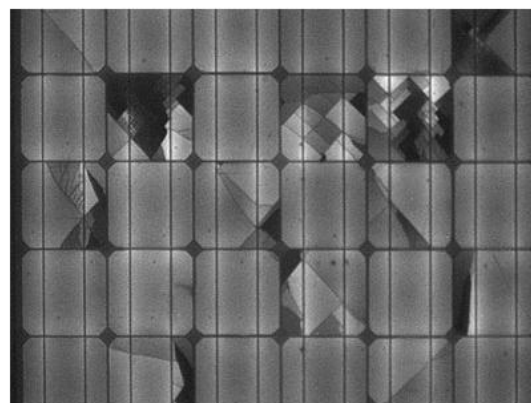
nižší intenzitou světla se jeví jako tmavší body a indikují poruchu ve struktuře materiálu. Většinou se jedná o nehomogenity difúzní vrstvy. Naopak výrazně světlejší místa znázorňují oblasti s vyšší proudovou hustotou. Metoda elektroluminiscence je nedestruktivní a je použitelná jak na samostatné fotovoltaické články, tak přímo na sestavené panely.



Obr. 2.8 – základ měřicí metody elektroluminiscence



ELCD - článek bez vad



ELCD - článek s defekty

Obr.2.9 – odhalení defektů pomocí metody elektroluminiscence, převzato z [12]

Metoda fotoluminiscence

Tato testovací metoda, je velice podobná metodě předchozí. Měření je možné provádět se stejným vybavením jako při metodě elektroluminiscence, s mírným rozdílem. Při této metodě je energie nutná pro zářivou rekombinaci dodávána vnějším světelným zdrojem.

Fotovoltaický článek je osvětčován zářením o určité zvolené vlnové délce, která musí být odfiltrována optickým filtrem před tím, než je snímána CCD kamerou. Při této metodě je tedy nutné vybavit objektiv CCD kamery optickým filtrem.

Metoda luminiscenční mikroplazmy

Tato metoda je založena na vzniku lokálních center mikroplazmy v místech strukturálních defektů. Tyto defekty vznikají při napětí v závěrném směru, které se blíží k průraznému. Mikroplazma se neprojevuje pouze vyzařováním světelného záření, ale i tzv. šumem mikroplazmy. Tento jev je podmíněn nedokonalostmi krystalické mřížky P-N přechodu. Oblasti těchto defektů se mohou vyznačovat nižší hodnotou průrazného napětí v závěrném směru než zbytek P-N přechodu. Při dosažení určité hodnoty napětí na P-N přechodu dochází v jejich okolí k lokálním lavinovým průrazům. Tyto defekty se projevují nejvíce na hranách fotovoltaického článku. Pro toto testování se používá stejné vybavení jako pro měření elektro nebo fotoluminiscenci, jediná změna je v obrácené polaritě napájecího napětí. V místech, kde nedokonalost krystalické mřížky protíná P-N přechod, dochází k lokálnímu lavinovému výboji, který je doprovázen šumem. Vznik mikroplazmy při výboji v polovodiči je obvykle doprovázen emisí světla, kterou je možno zachytit CCD kamerou a následně analyzovat. Při měření platí přímá úměra velikosti měřícího proudu a počtu viditelných center mikroplazmy. Tato měřicí metoda může být při překročení maximálního závěrného proudu destruktivní, neboť dojde k lavinovému průrazu P-N přechodu. V oblasti mikroplazmy může také protékat značně velký proud a tím způsobit lokální ohřev v takové úrovni, kdy může dojít ke zničení P-N přechodu. Je proto nutné při této metodě pečlivě nastavovat velikost závěrného napětí.

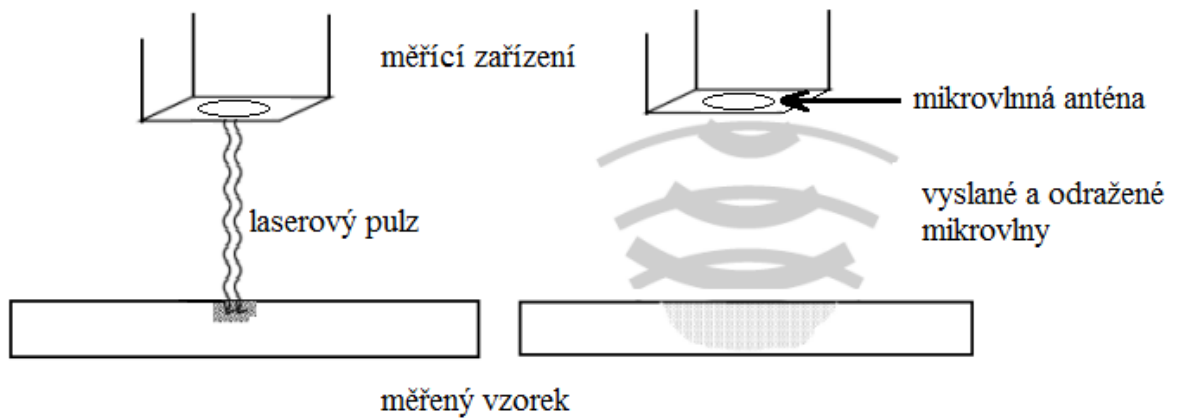
Dynamické testování fotovoltaických článků

Tímto testováním zjišťujeme kvalitu a účinnost fotovoltaických článků. Metoda dynamického testování je založena na odezvě článku na rychlé přechodné děje, které v něm mohou nastat. Při tomto testování se měří doba života nosičů, průrazné napětí, bariérová kapacita a sériový odpor. Získáme tím informace o kvalitě použitého materiálu, tedy i rekombinačních procesech, difúzní kapacitě, velikosti závěrného napětí a dalších. Toto měření je nenáročné na drahé přístroje a zařízení. Pomocí proudového impulsu v závěrném směru je možné přesně změřit závěrné napětí přechodu (viz. str. 28), ohodnotit jeho lavinové vlastnosti a nepřímo určit šířku přechodu. Z časové odezvy na buzení proudovými impulzy v propustném směru lze poměrně přesně určit sériový odpor celého článku včetně jeho kontaktů a také odhadnout dobu života minoritních nosičů.

Metody pro stanovení doby života minoritních nosičů

Efektivní doba života minoritních nosičů je základním parametrem pro charakterizaci křemíkové struktury a je nepřímo úměrná efektivní rekombinaci. První metoda se nazývá PCD (photoconductance decay). Jedná se o mapování fotovodivosti v měřeném vzorku po krátkém světelném pulzu. Doba života minoritních nosičů je zde počítána z naměřené fotovodivosti, která je měřena v tzv. transientním módu. Tento mód znamená vyvolání generace nadbytečných nosičů krátkým a ostrým světelným pulzem, který je rychle vypnut. Tímto krátkým pulzem se v polovodičové struktuře začne ustavovat rovnováha. Změna vodivosti je monitorována detekčním zařízením a je vypočítána efektivní doba života nosičů náboje.

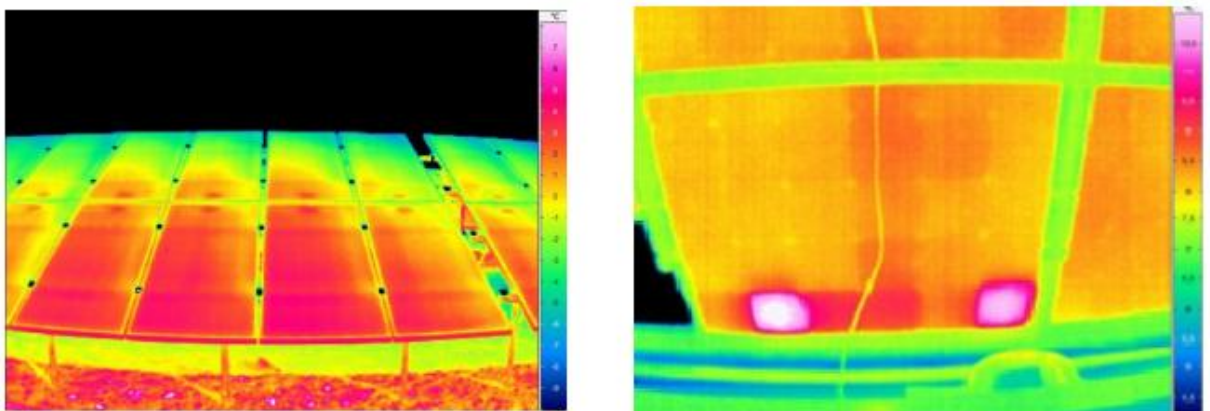
Nejčastěji se používají dvě varianty, mezi nimiž je rozdíl v měření fotovodivosti. V prvním případě se fotovodivost měří indukčně pomocí cívky, která je umístěna pod měřený vzorek. Tato cívka je zkalibrována pro co největší rozsah vodivosti, z kterých se poté přímo vypočítá hustota nadbytečných nosičů. Druhá varianta tohoto testování detekuje plošné rozložení doby života pomocí změny fotovodivosti substrátu snímané mikrovlnami, v závislosti na intenzitě světla generovaného laserovou diodou. Tato metoda je označována zkratkou MW-PCD (Microwave Photoconductance decay) a lze ji použít jen pro malé signály z důvodu značně nelineární funkce, která závisí na hustotě volných nosičů náboje. Tato nelinearita netvoří překážku pro měření doby života při nízké koncentraci nosičů, avšak způsobuje problém měření při vyšších koncentracích nosičů. To představuje značný problém, protože případ vyšších koncentrací nosičů je středem zájmu při měření fotovoltaických článků. Tento problém lze odstranit zvýšením hustoty volných nosičů na určitou hladinu pomocí přídatného osvětlení. Krátký světelný pulz, který je vygenerován, se na tuto hladinu pouze superponuje. Samotné měření zjednodušeně popisuje obrázek 2.10. Hlavní úlohu zde tvoří integrovaná měřicí hlava, ve které je umístěn vysílač a přijímač mikrovln spolu s laserovou diodou, která zajišťuje generaci párů elektron-díra. Jde o diodu pracující v infračervené oblasti s vlnovou délkou generovaných paprsků $\lambda = 904 \text{ nm}$. Této vlnové délce odpovídá hloubka proniknutí záření $30 \text{ }\mu\text{m}$. Délka pulzu bývá obvykle kolem 100 ns s frekvencí pulzů 2 kHz . První zmíněná varianta metody pro stanovení doby života minoritních nosičů, která detekuje fotovodivost indukčně, má oproti metodě MW-PCD výhody hlavně v pořizovací ceně, jednoduchosti údržby a hlavně v přesné a rychlé měření přes široký rozsah úrovní koncentrace nosičů. Metoda MW-PCD má výhodu v tom, že krátký světelný pulz je generován pomocí laseru, který má velmi krátkou dobu vypnutí, a proto může velmi přesně měřit i vzorky s kratší dobou života.



Obr. 2.10 – popis metody pro stanovení doby života minoritních nosičů, vlevo změna fotovodivosti laserovým pulsem a vpravo odražené mikrovlny

Termovizní diagnostika fotovoltaických článků

Tato metoda testování je v porovnání s přímým měřením charakteristik velice rychlá, není však tak kvalitní. Termokamera umožňuje měřit teplotu povrchu fotovoltaických panelů při jejich zatížení a odhalit tak články s vyšším oteplením než je obvyklé. Tyto panely je poté vhodné diagnostikovat přímo. Pomocí termokamery lze snadno odhalit defekty elektrických komponentů, lokalizovat problémy s pájecími body a jiné další. Tyto defekty se zjišťují ze snímků pořízených touto kamerou a tyto snímky určují spektrum teplot na povrchu měřeného objektu. Termokamera převádí infrazářeni do viditelného spektra vlnových délek. Každá barva, jak je pro příklad vidět na obrázku 2.11, definuje určitou teplotu. Na obrázku vlevo je vidět rozložení teploty při celkovém pohledu na fotovoltaickou elektrárnu, obrázek vpravo již naznačuje místa v článku s možnými defekty. Tato metoda testování poskytuje rychlé a jednoduché informace o fotovoltaickém článku a odhaduje výskyt možných defektů a oblastí budoucích rizik.



Obr. 2.11 – teplotní spektrum při měření termokamerou, převzato z [21]

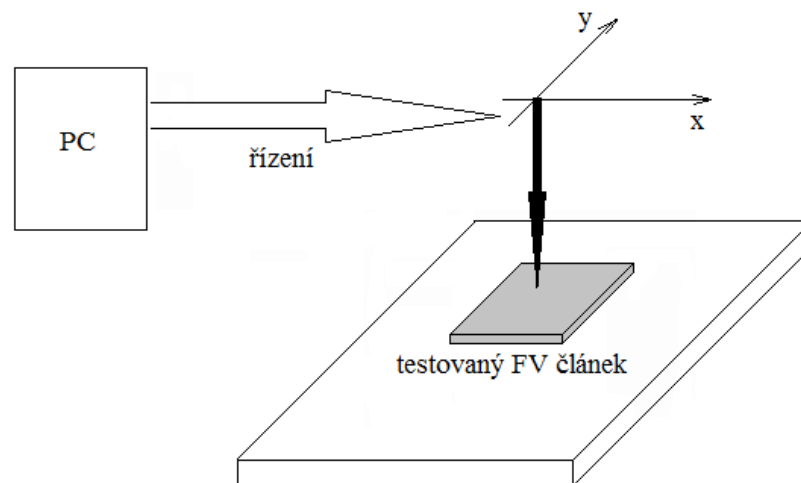
Flesh test

Tento test se též nazývá sluneční či bleskový. Umí posoudit kompletní elektrickou charakteristiku panelu, tedy i s jeho případnými odchylkami. Při tomto testu je použit speciálně vyvinutý zdroj světla, který má za úkol co nejpřesněji simulovat spektrum slunečního záření v celém viditelném spektru. Používá se proto xenonová nebo halogenidová výbojka, protože se nejvíce blíží spektru slunečního záření. Pomocí optických systémů je vytvořen homogenní svazek rovnoběžných paprsků, které dopadají kolmo na zkoumaný fotovoltaický článek. Fotovoltaické články jsou testovány při osvětlení s intenzitou 1000 W/m^2 . Toto měření je velice rychlé a lze analyzovat během několika sekund.

3 Návrh měřicího pracoviště metody LBIC

3.1 Rozložení pracoviště

Pro návrh měřicího pracoviště pro měření pomocí metody LBIC potřebujeme v první řadě ovládací zařízení, tedy počítač, který bude softwarově řídit zařízení, které bude pohybovat se světelným zdrojem v osách x a y . Toto pracoviště přibližně nastiňuje obrázek 3.1. Světelný zdroj, který osvicuje testovaný fotovoltaický článek, není obsahem této práce. Úkolem je vytvořit zařízení, které bude mechanicky schopné dle zadaného programu projet určitou naprogramovanou dráhu.



Obr. 3.1 – schéma rozložení měřicího pracoviště

3.2 Řešení pohyblivé části

Zařízení, které se dokáže pohybovat po zadaných souřadnicích v osách x a y existuje mnoho. Pro tento návrh byl použit starší plotter Colorgraf Aritma 512. Grafické vyjádření tohoto zařízení probíhá v soustavě pravoúhlých souřadnic, přičemž obě souřadnice jsou řízeny vestavěným mikroprocesorovým řadičem. Tento souřadnicový zapisovač je primárně určen pro kreslení plošných spojů, vykreslování různých grafů, tabulek a lze s ním kreslit i technické výkresy. Plotter Colorgraf Aritma 512 byl vyráběn počátkem devadesátých let firmou Aritma Praha. Pro tento návrh bylo zařízení zakoupeno na internetové aukci. Aby mohl vzniknout návrh funkčního vzorku pro testování pomocí metody LBIC, následovaly opravy, úpravy a odstranění různých elektrických a mechanických částí. To se týkalo hlavně výměny jednoho ze dvou krokových motorků pro posun v ose x a úpravy a odstranění mechanických částí, které pro daný návrh nevyhovovaly. Jednalo se především o odstranění sady nástavců nacházejícího se vedle vlastního zařízení, které by sloužilo pro osvit

fotovoltaického článku a další mechanické úpravy v pojezdech, ve kterých se mechanická hlava pro osvit fotovoltaického článku pohybuje. Dále bylo nutné vytvořit nástavec, do kterého by se testovaný článek vložil a nad ním by se pohybovala mechanická hlava pro snímání veličin v zadaných souřadnicích.

3.3 Základní popis plotteru

Mechanická část

Celý plotter, který je znázorněn na obrázku 3.2 je tvořen kompaktní mechanickou částí, ke které je ve spodní části přišroubována deska s obvody mikroprocesoru a deska pulzního zdroje pro napájení celého systému. Nosnou část tvoří spojené nosníky, na nichž je pracovní plocha. V této nosné části je v kuličkových ložiskách uložena hřídel transportu, která je osazena dopravními válci s drsným povrchem pro posun ve směru osy y, dále vodící šroub a vodící tyč s lištou pro posun ve směru osy x. Hřídel transportu je poháněn krokovým motorkem pomocí ozubeného soukolí. Vodící šroub pro posun v ose x, který se nachází nad pracovní plochou, je poháněn přímo krokovým motorkem přes pružnou spojku. Vlastní zařízení, které by sloužilo pro osvit článku, by bylo připevněné na vodící tyči s lištou, která se pohybuje v důsledku otáčení vodícího šroubu. Nad dopravními válci na pracovní ploše jsou umístěny pryžové přitlačné kladky, které dotlačují vytvořený nástavec pro uchycení testovaného fotovoltaického článku přímo na dopravní válce tak, aby nedocházelo k prokluzování a posun v ose y byl zcela přesný. Po vycentrování této formy do přesně požadované pozice dochází k přitlaku na dopravní válce páčkou umístěnou v pravém dolním rohu pracovní plochy.

Elektrická část

Tato část je konstrukčně rozdělena na čtyři dvouvrstvé desky s tištěnými spoji. Jednotlivé desky tvoří zdrojovou část, ovládací panel, mikroprocesorový řadič s ovládacími obvody pro krokové motory a paměť s řídicím programem.

Zdrojová část, která je umístěná v levé spodní části tvoří spínaný zdroj s konstantním kmitočtem s jednočinným blokujícím měničem. Síťové napětí se po usměrnění přivádí do pulzního měniče, kde je spínacím tranzistorem převedeno na napětí s obdélníkovým průběhem, které se přivádí na primární vinutí výkonového transformátoru. Zde se galvanicky oddělí a transformuje na napětí 24 V, které je použito pro ovládání krokových motorků. Pomocí dalšího měniče se získává ještě napětí +5 a -5 V pro napájení logických obvodů a operačních zesilovačů.

Jádro elektronické části plotteru tvoří mikroprocesorový řadič. Veškerá činnost tohoto řadiče je řízena řídicím programem, tzv. firmware, který je uložen v paměti EPROM o kapacitě 12 kb. Hlavní funkcí toho programu je ovládání pohybu v obou souřadných osách a reakce na povely z ovládacího zařízení pro manuální řízení. Tento řadič je postaven na bázi mikroprocesoru UB 880D s pracovním kmitočtem 2,4578 MHz. Mikroprocesor tvoří osmibitovou datovou sběrnici a šestnáctibitovou adresovou sběrnici. Je propojen s pamětí typu RAM o kapacitě 1 kb řídicími signály ME, RD, WR, IOW a IOR. Dalšími obvody, které jsou řízeny mikroprocesorem UB 880D jsou dva obvody K580, které v sobě obsahují tři šestnáctibitové programovatelné čítače. Tyto čítače jsou adresovány hexadecimálně a jsou součástí obvodů pro ovládání krokových motorků pro posuv ve směru osy x a y. První z čítačů funguje jako tzv. předdělicí čítač. Ten je řídicím programem nastavován tak, aby nebyl překročen maximální pracovní kmitočet krokových motorků. Další čítače jsou určeny pro posuv ve směru osy x a y přímo, určováním frekvence krokování motorků posuvu. Na tyto čítače navazují ještě dva obousměrné čtyřbitové čítače, které přičítají nebo odčítají vstupní pulzy z předchozích čítačů. Toto přičítávání nebo odčítávání závisí na požadovaném směru posuvu, který je řízen řídicím programem. Za těmito čítači pak následují dvě paměti typu EPROM, pro každý krokový motorek jedna. Obě paměti mají funkci dekodéru pro ovládání jednotlivých fází krokových motorků. Dále následují spínací obvody pro buzení obou krokových motorků. Komunikace s řídicím systémem probíhá seriově v asynchronním režimu pomocí signálů definovaných popisem rozhraní RS-232.

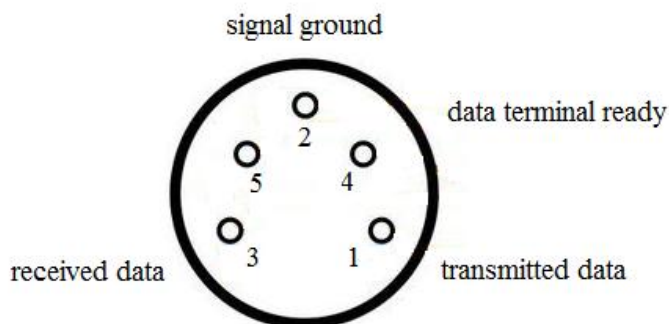


Obr. 3.2 – plotter Colorgraf Aritma 512

3.4 Způsob propojení plotteru s PC

Činnost plotteru Colorgraf Aritma 512 můžeme provádět pomocí dvou způsobů. První způsob je manuální, tedy ručně pomocí tlačítek umístěných na krytu zařízení. Druhým způsobem je řízení programem. Program zapisovače je organizovaný soubor tzv. grafických

instrukcí, kterým zadáváme úkony, které má uskutečnit. Tyto instrukce se po přijetí přes standardní seriové asynchronní rozhraní RS-232 uloží do vnitřní paměti zapisovače. Řídící počítač slouží jako generátor a vysílač programu. Po zapnutí je toho zařízení připraveno komunikovat s počítačem rychlostí 1200 nebo 9600 Bd a formát přenosu dat je tvořen jedním start bitem, po kterém následuje sedm bitů dat, jeden bit sudé parity a jeden stop bit. Na straně plotteru je pro přenos dat umístěn pěti-pólový DIN konektor. Na obrázku 3.3 je tento konektor naznačen s popisem vývodů, které jsou použity pro přenos dat mezi plotterem a PC.



Obr. 3.3 – pěti-pólový DIN konektor s popisem vývodů určených pro ovládání plotteru

Pro ovládání pomocí PC je tedy nutná redukce z konektoru Cannon, který je určen pro rozhraní RS-232 na pěti-pólový DIN konektor. Propojení a popis jednotlivých vývodů je vidět v tabulce 3.2.

pěti-pólový DIN konektor		devíti-pólový konektor Cannon	
vývod	signál	vývod	signál
1	transmitted data (vyslaná data)	2	received data (přijata data)
2	signal ground (signálová zem)	5	signal ground (signálová zem)
3	received data (přijata data)	3	transmitted data (vyslaná data)
4	data terminal ready (terminál připraven)	6	data set ready (nastavení dat připraveno)
	7,8 propojeny	7	request to send (požadavek na odeslání)
		8	clear to send

Obr. 3.4 – popis a propojení jednotlivých signálů

3.5 Řízení plotteru pomocí PC

Pro řízení činnosti plotteru existují dva základní přístupy. Prvním z nich je použití specializovaného grafického systému, který tvoří zpravidla rozsáhlý softwarový balík, který slouží pro převedení vytvořeného výkresu v PC do instrukcí programu konkrétního zapisovače. K těmto programům slouží např. Autocad, Orcad, Eagle, a další. Druhým způsobem je vytvoření uživatelského programu pomocí jednotlivých grafických instrukcí zapisovače, k tomu využívá plotter Colorgraf Aritma 512 jeden z nejrozšířenějších jazyků – HP-GL (Hewlett Packard Graphics Language).

3.6 Programování plotteru

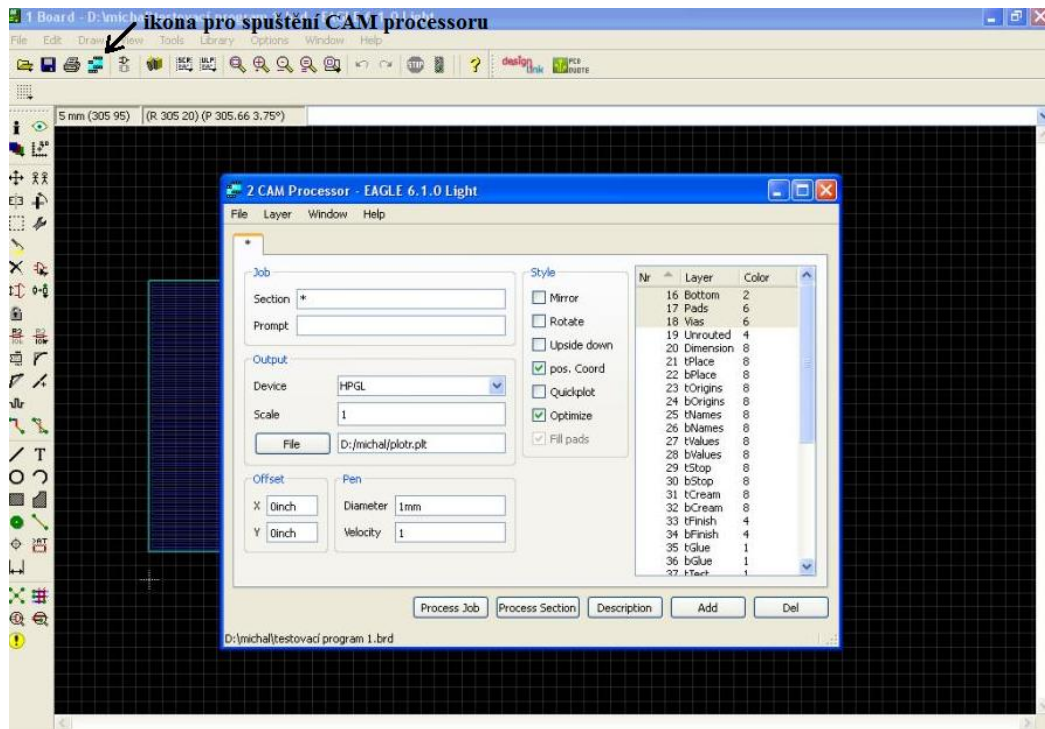
Jak bylo psáno v předchozí kapitole, plotter komunikuje s počítačem přes seriové rozhraní RS-232 instrukcemi grafického jazyka HP-GL. V plotteru vstupují všechny grafické instrukce do vnitřního bufferu, který je realizován jako paměť typu FIFO. Z tohoto bufferu jsou postupně vybírány a prováděny. Řídící instrukce se do bufferu nepředávají, ale jsou prováděny okamžitě po přijetí. Instrukce jazyka HP-GL se skládají z dvoupísmenného mnemotechnického kódu, za nímž obvykle následují číselné parametry. Je-li v instrukci uvedeno více číselných parametrů, musí být mezi sebou odděleny alespoň jednou mezerou, čárkou nebo znaménkem plus, či mínus. Podle syntaxe se konec instrukcí odděluje středníkem. Za středníkem může pak následovat komentář. Číselné parametry jsou přípustné ve formátu celočíselném (integer), zde je parametrem celé číslo v rozsahu -32768 až +32767, dále desetinném (decimal) s parametrem čísel -128,000 až +127,9999, znakovém (character), kde je parametr libovolný znakový řetězec v ASCII kódu s dekadickou hodnotou 0 až 127 a jako poslední je přípustný formát měřítkový desetinný (scaled decimal), kde parametrem je číslo v rozsahu -32768,0000 až +32767,9999. V příloze (příloha 1) je uveden kompletní seznam všech grafických instrukcí používaných pro programování tohoto plotteru.

3.7 Programování plotteru pro měření pomocí LBIC

Pomocí specializovaného grafického programu

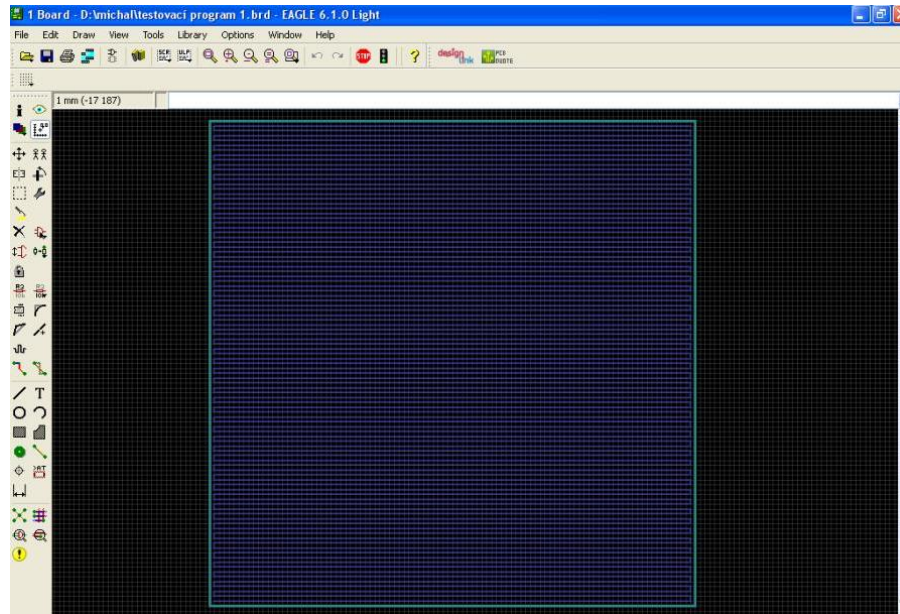
První popsáný způsob je pomocí návrhového programu pro kreslení plošných spojů – EAGLE. Tento program umožňuje grafické vykreslování různých motivů a drah s různou tloušťkou čar. Pro odeslání takového grafického výkresu do plotteru ve formátu HP-GL se používá tzv. CAM procesor, který je součástí tohoto softwaru. Nejprve je nutné nakreslit požadovaný grafický motiv, který chceme pomocí plotteru vykreslit. Poté tento motiv uložíme a spustíme CAM procesor, dle obrázku 3.5 a nastavíme ho dle žádaných vlastností. V záložce *device* vybereme typ grafického jazyka, tedy HPGL. V další záložce *scale* napíšeme jedničku, pokud chceme, aby bylo vykreslované měřítko s nakresleným v poměru 1:1. Poté klikneme na tlačítko *file* a vybereme složku na disku počítače, kam následně grafický návrh z eaglu uložíme s příponou *plt*. V záložce *offset* je možné zadat posun počátku vůči souřadnému systému. U záložky *pen* se nastavuje parametr *diameter* – tloušťka vykreslované čáry, resp. pro kreslení plošných spojů tloušťka pera a parametr *velocity* slouží pro nastavení rychlosti posuvu plotteru v rozmezí od 0,1 do 80 mm/s. U záložky *style* stačí zaškrtnout ikonku *optimize*, která spustí optimalizaci postupu kreslení pro plotter a vpravo

v liště vybereme vrstvu, ve které byl grafický návrh kreslen. Zpravidla je vhodné vybrat vrstvu 16, 17 a 18. Celý takto nastavený CAM procesor potvrdíme ikonou *process job*.

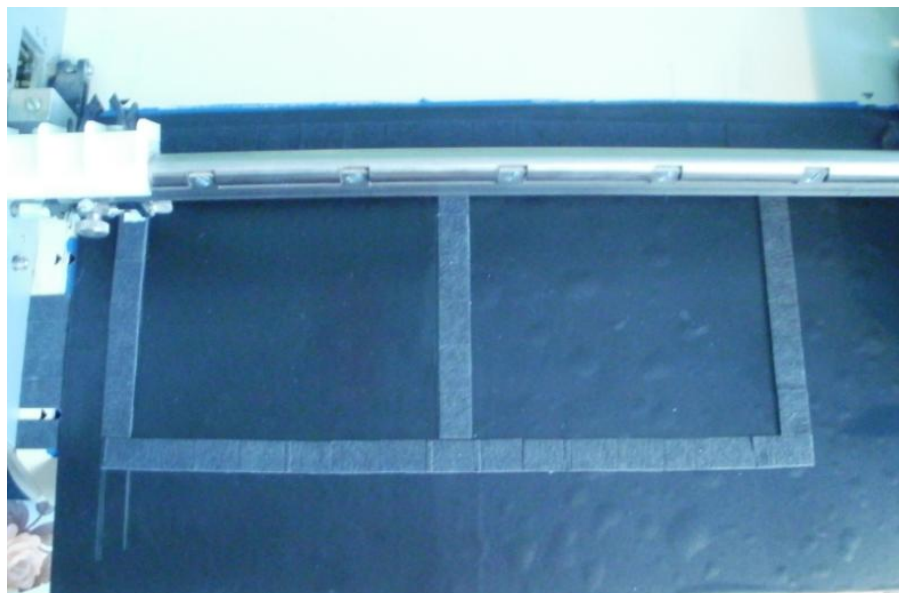


Obr. 3.5 – spuštění a nastavení CAM procesoru

Pro odeslání takto vytvořeného návrhu do plotteru lze vytvořit jednoduchý spouštěcí soubor s příponou bat. Návrh takto vytvořeného souboru je uveden v příloze (příloha 2). Po spuštění tohoto souboru již začne plotter vykreslovat grafický návrh. Na obrázku 3.6 je vidět grafický návrh pro zkušební metodu LBIC. Vycházíme z velikosti testovaného fotovoltaického článku o velikosti 100 x 100 mm. Z obrázku 3.6 je patrná dráha, po které by měla projet snímací hlava plotteru, na které by byla umístěna osvitová jednotka pro testování metodou LBIC. Tato dráha je vytvořená přesně pro navrženou formu, do které se testovaný fotovoltaický článek vloží (viz obrázek 3.7). V této formě je prostor pro vložení dvou kusů testovaných článků. Návrh je realizován pouze pro jednu z nich. Rastr dráhy je volen po řádcích s krokem mezi jednotlivými řádky o velikosti 1 mm. Toto rozlišení jsem volil proto, aby na pořízené videonahrávce v příloze na CD byl vidět posun snímací hlavy plotteru co nejlépe. Pro testování defektů fotovoltaických článků pomocí metody LBIC je vhodný rastr s co nejmenším posunem, tedy nejlepším rozlišením tak, aby získaná proudová mapa, která modeluje chování celého článku v jeho jednotlivých částech, byla co nejkvalitnější. Plotter Colorgraf Aritma 512 umožňuje nejmenší posun o velikosti 0,0249 mm s přesností 0,4%. Záleží tedy pouze na grafickém návrhu a jeho úpravě tak, aby byl zvolen nejvhodnější posun snímací hlavy pro tuto metodu a získané proudové mapy tak byly co nejkvalitnější.



Obr. 3.6 – naznačení dráhy plotteru pro testování metody LBIC

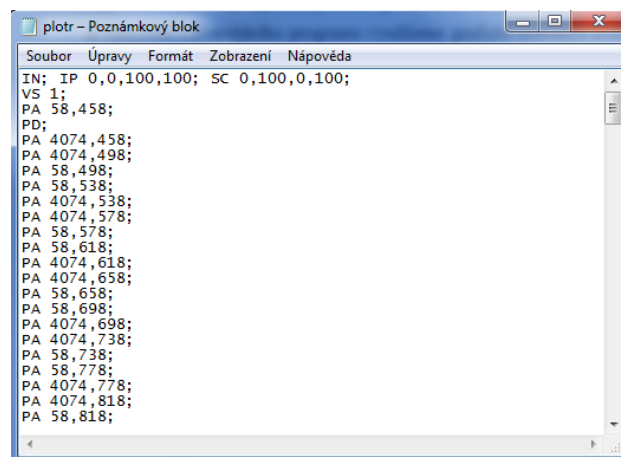


Obr. 3.7 – vytvořený nástavec (forma) pro vložení testovaného článku

Vytvoření uživatelského programu pomocí grafických instrukcí

K vytvoření uživatelského programu využijeme grafické instrukce uvedené v příloze (příloha 1). Program pro ovládání činnosti plotteru lze vytvořit v jakémkoli z jednoduchých textových editorů. K napsání takového programu tedy zcela postačuje obyčejný poznámkový blok. Na obrázku 3.8 je vidět úvod takového programu, který je celý uveden v příloze na CD. V první řádce je v úvodu instrukce IN, která nastavuje všechny funkční parametry zapisovače na standardní hodnoty, odpovídající stavu po zapnutí. Následuje instrukce IP, která stanoví polohu referenčních bodů podle zadaných souřadnic. V mém případě, pro testování

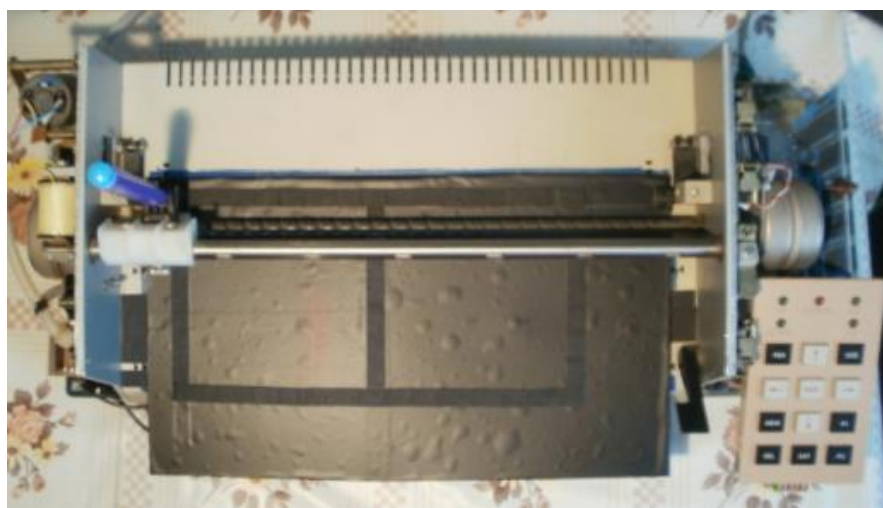
fotovoltaického článku o velikosti 100 x 100 mm, se jedná o souřadnice na ose x [0,0] a na ose y [100,100]. Zadané parametry jsou v milimetrech. Instrukce SC nastaví uživatelské měřítko rovněž v hodnotách jako předchozí instrukce. Další instrukcí je VS, kterou definujeme rychlost pohybu snímací hlavy v rozsahu 0,1 až 80 mm/s. Tuto hodnotu vyjadřujeme číselně v rozsahu 0,1 až 8. Instrukce PA již nastaví výchozí souřadnici pro posun plotteru. Následuje ještě instrukce PD, která vyrovnává snímací hlavu přesně do směru kolmého k pracovní ploše. Následují instrukce, které z momentální pozice přesunují snímací hlavu do bodu určeného zadanou souřadnicí. Zde nastává problém se zápisem souřadnic. Souřadnice se totiž nezapisují v milimetrech, ale v tzv. „kreslicích jednotkách“. Jedna kreslicí jednotka vyjadřuje posun snímací hlavy plotteru o 0,0249 mm. Chceme-li, aby se snímací hlava posunula z pozice [0,0] na pozici [100,100] mm musíme danou souřadnici vyjádřit v těchto kreslicích jednotkách. Posun o velikosti 100 mm se vyjádří jako $100 / 0,0249 = 4016$. Souřadnice bodu [100,100] budou tedy [4016,4016]. Takto se zapíše všechny souřadnice, kterými má plotter snímací hlavou projet. Celý tento textový soubor se uloží jako v případě grafického návrhu s příponou plt kamkoli na disk počítače. Pokud chceme tento soubor odeslat do plotteru, použijeme již vytvořený spouštěcí soubor s příponou bat. V mém případě jsem podle vytvořené formy viz. obr. 3.6 navrhl dráhu rovněž totožnou jako pomocí grafického programu. Pro převod souřadnic, které jsou v milimetrech na souřadnice udané v kreslicích jednotkách jsem vytvořil jednoduchou tabulku v excelu, která je v příloze na CD.



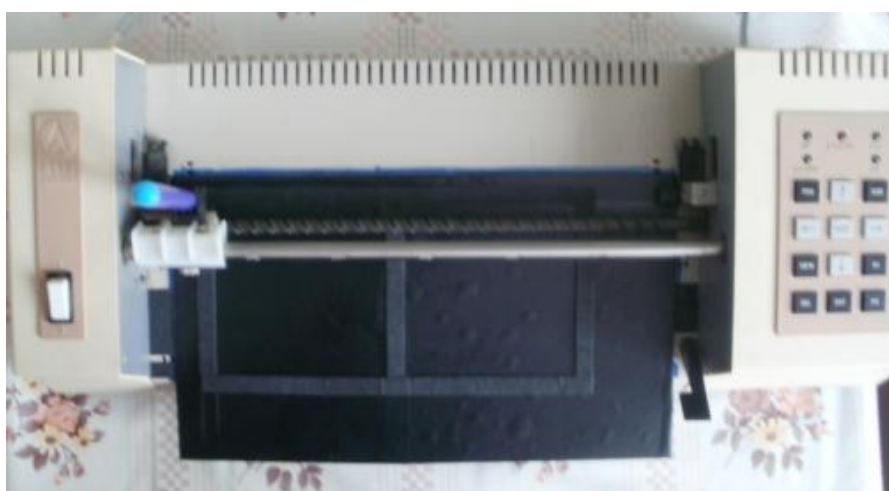
```
plotr - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
IN; IP 0,0,100,100; SC 0,100,0,100;
VS 1;
PA 58,458;
PD;
PA 4074,458;
PA 4074,498;
PA 58,498;
PA 58,538;
PA 4074,538;
PA 4074,578;
PA 58,578;
PA 58,618;
PA 4074,618;
PA 4074,658;
PA 58,658;
PA 58,698;
PA 4074,698;
PA 4074,738;
PA 58,738;
PA 58,778;
PA 4074,778;
PA 4074,818;
PA 58,818;
```

Obr. 3.8 – výřez uživatelského programu

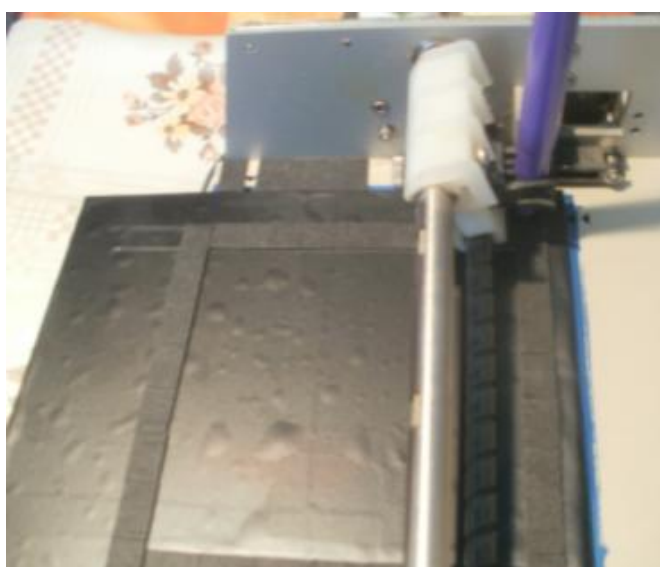
Pomocí obou vytvořených programů lze provádět testování fotovoltaických článků metodou LBIC. Na obrázku 3.9 je vidět celková koncepce vytvořené formy formy pro vložení testovaného fotovoltaického článku a odkrytovaného plotteru a obrázku 3.10 je vidět totéž s plotrem, který je opatřený krytem. Obrázek 3.11 ještě poskytuje detail na formu a snímací hlavu. Místo snímací hlavy s osvitovou jednotkou byl do držáku fiktivně vložen lihový fix.



Obr. 3.9 – celková koncepce odkrytovaného plotteru a formy pro vložení článku



Obr. 3.10 – celková koncepce zakrytovaného plotteru a formy pro vložení článku



Obr. 3.11 – detail nástavce (formy) pro vložení testovaného článku a snímací hlavy

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámení s podstatnými pojmy z oblasti fotoelektrických jevů, zvláště pak vysvětlení fotovoltaiického děje. V úvodu této práce jsem popsal základní rozdělení fotoelektrického jevu, dále strukturu fotovoltaiického článku, materiály, ze kterých se fotovoltaiické články vyrábí a v neposlední řadě důležité základní parametry. V další části této práce jsou popsány jednotlivé defekty, které mohou nastat již při výrobě samotného článku nebo s následnou manipulací při testování nebo montování do fotovoltaiických systémů. Pro testování fotovoltaiických článků existuje několik metod. Můžeme použít buď metody měření elektrických parametrů, nebo metody optické diagnostiky. V této práci jsem popsal nejpoužívanější metody z obou těchto skupin. Nejvíce je zde popsána metoda testování LBIC, jelikož bylo mým úkolem pro tuto metodu navrhnout měřicí pracoviště. Pro tento návrh jsem použil starší souřadnicový zapisovač neboli plotter. Metody pro řízení plotteru jsou založeny buď na použití specializovaného grafického systému, ve kterém se vytvoří grafický výkres nebo vytvořením tzv. uživatelského programu pomocí jednotlivých grafických instrukcí zapisovače. V této práci jsou zdokumentovány obě dvě metody. Použitý plotter byl mechanicky upraven tak, aby vyhověl návrhu tohoto měření. Na pracovní ploše plotteru byl vytvořen nástavec, do kterého se testovaný fotovoltaiický článek vloží. Tato forma je vytvořena pro dva články o rozměrech 100 x 100 mm vedle sebe s odstupem 10 mm, ale použitý program je vytvořen pouze pro jeden z nich. V příloze na přiloženém CD jsou vytvořeny dvě videonahrávky, které popisují testování metodou LBIC vyhovované tímto plotterem. U obou videonahrávek je vidět snímací hlava, která se pohybuje nad vytvořeným nástavcem. Rozdíl mezi nahrávkami je v rychlosti posunu. U jedné z nich tato rychlost činí 20 mm/s a u druhé 0,1 mm/s. Hodnota 0,1 mm/s je nejpomalejším možným posunem tohoto zařízení. Rozteč jednotlivých drah mezi sebou činí pro dobrou zřetelnost na videonahrávce 1 mm. Tato rozteč lze samozřejmě jednoduše snížit až na 0,0249 mm. V tomto případě by byla naměřená proudová odezva z testovaného článku nejkvalitnější.

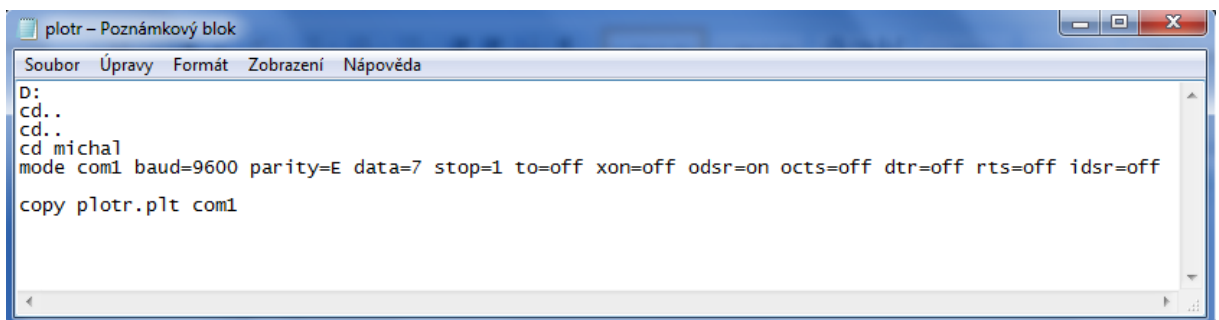
Příloha

Příloha 1 – sada grafických instrukcí plotteru

AA	Arc absolute
AR	Arc relative
CA	Designate alternace set
CI	Circle
CP	Character plot
CS	Designate standard set
DC	Digitize clear
DF	Set default values
DI	Absolute direction
DP	Digitize point
DR	Relative direction
DT	Define label terminator
IM	Input mask
IN	Initialize
IP	Input P1 and P2
IW	Input window
LB	Label text string
LT	Line type
OA	Output achal position
OC	Output commanded position
OD	Output digitized point
OE	Output error
OF	Output factors
OH	Output hard-clip limits
OI	Output identification
OO	Output options
OP	Output P1, P2
OS	Output status
OW	Output window
PA	Plot absolute
PD	Pen down

PR	Plot relative
PS	Paper size
PU	Pen up
RO	Rotate coordinate system
SA	Select alternate set
SC	Scale
SI	Absolute character size
SL	Absolute character slant
SM	Symbol mode
SP	Select Pen
SR	Relative character size
SS	Select standard set
TL	Tick length
UC	User-defined character
VS	Velocity select
XT	X-axis tick
YT	Y-axis tick

Příloha 2 – vytvořený spouštěcí soubor s příponou bat



```
D:\
cd..
cd..
cd michal
mode com1 baud=9600 parity=E data=7 stop=1 to=off xon=off odsr=on octs=off dtr=off rts=off idsr=off
copy plotr.plt com1
```

První čtyři řádky obsahují příkazy systému MS-DOS pro otevření složky, kde je uložen vytvořený soubor s příponou plt. Následující řádka nastavuje parametry pro přenos přes seriové rozhraní RS-232.

Seznam obrázků

- 1.1 rozdělení fotoelektrického jevu
- 1.2 fotoemise
- 1.3 fotovodivost
- 1.4 fotovoltaický jev
- 1.5 řez a naznačení principu fotovoltaického článku
- 1.6 struktura texturovaného článku
- 1.7 fotovoltaický článek s lokální defektní vrstvou
- 1.8 struktura současných fotovoltaických článků
- 1.9 základní rozdělení druhů FV článků
- 1.10 druhy fotovoltaických článků
- 1.11 řez a naznačení principu MIS článku
- 1.12 řez fotovoltaickým panelem
- 1.13 V-A charakteristika fotovoltaického článku
- 1.14 schéma pro měření proudu nakrátko
- 1.15 V-A charakteristika obecné fotodiody
- 1.16 příklady spektrálních charakteristik fotodiody podle použitého materiálu
- 1.17 náhradní schéma fotovoltaického článku
- 2.1 základní rozdělení defektů FV článků
- 2.2 zobrazení vírového defektu
- 2.3 zobrazení defektu vnitřního pnutí materiálu
- 2.4 zobrazení defektu nehomogenity difúzní vrstvy
- 2.5 zobrazení defektů poškrábání, výskytu prachových částic a skrytého lomu
- 2.6 základní schéma zapojení měřicí metody LBIC
- 2.7 základ měřicí metody EBIC
- 2.8 základ měřicí metody elektroluminiscence
- 2.9 odhalení defektů pomocí metody elektroluminiscence
- 2.10 popis metody pro stanovení doby života minoritních nosičů
- 2.11 teplotní spektrum při měření termokamerou
- 3.1 schéma rozložení měřicího pracoviště
- 3.2 plotter Colorgraf Aritma 512
- 3.3 pěti-pólový DIN konektor s popisem vývodů určených pro ovládání plotteru
- 3.4 popis a propojení jednotlivých signálů

- 3.5 spuštění a nastavení CAM processoru
- 3.6 naznačení dráhy plotteru pro testování metody LBIC
- 3.7 vytvořený nástavec (forma) pro vložení testovaného článku
- 3.8 výřez uživatelského programu
- 3.9 celková koncepce odkrytovaného plotteru a formy pro vložení článku
- 3.10 celková koncepce zakrytovaného plotteru a formy pro vložení článku
- 3.11 detail nástavce (formy) pro vložení testovaného článku a snímací hlavy

Použitá literatura

- [1] Libra, Martin a Vladislav Poulek: *Solární energie*. Vydala Česká zemědělská univerzita v Praze, červen 2005
- [2] Brož, Karel a Bořivoj Šourek: *Alternativní zdroje energie*. Vydalo české vysoké učení technické v Praze, 2003
- [3] Parametry fotovoltaických článků [cit. 2012-2-15]. Dostupné z www:
http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_001_cviceni/001_parametry_fvc.pdf
- [4] Matematický model V-A char. fotovoltaického článku [cit. 2012-2-15]. Dostupné z www:
http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_002_cviceni/002_mat_model_fvc.pdf
- [5] Fotovoltaika [cit. 2012-2-20]. Dostupné z www:
<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [6] Využití solární energie - fotovoltaické články [cit. 2012-3-10]. Dostupné z www:
http://www.kpssoft.eu/techinfo/00104/Solarni_energie.pdf
- [7] Aktuální trendy diagnostických metod FV článků [cit. 2012-3-12]. Dostupné z www:
<http://www.cemc.cz/OZE2011/116.pdf>
- [8] Fotovoltaické články [cit. 2012-3-25]. Dostupné z www:
<http://www.stresniinstalace.cz/fotovoltaika/fve-panel/>
- [9] Tenkovrstvé FV technologie [cit. 2012-4-2]. Dostupné z www:
<http://www.votum.cz/Thin-film/>
- [10] Solární fotovoltaika [cit. 2012-4-2]. Dostupné z www:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/aktuality/bousek-fotovoltaika.pdf>
- [11] Solární články z krystalického křemíku [cit. 2012-4-10]. Dostupné z www:
<http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>
- [12] Diagnostika FV modulů a FVE [cit. 2012-4-11]. Dostupné z www:
<http://www.abot.cz/cs/sluzby/diagnostika-fv-modulu-a-fve>

- [13] Pracoviště pro testování solárních článků metodou LBIC [cit. 2012-3-11]. Dostupné z www:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7259
- [14] Diagnostické metody fotovoltaických článků [cit. 2012-4-19]. Dostupné z www:
<http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku-2100.html>
- [15] Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků [cit. 2012-4-5]. Dostupné z www:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10267
- [16] Modifikace měřicího pracoviště pro měření solárních článků [cit. 2012-4-5]. Dostupné z www:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14000
- [17] Fotoluminiscenční metody detekce defektů FV [cit. 2012-4-5]. Dostupné z www:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14213
- [18] Měření doby života nosičů proudu ve strukturách křemíkových solárních článků [cit. 2012-4-22]. Dostupné z www:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16122
- [19] Pracoviště pro dynamické testování solárních článků [cit. 2012-4-1]. Dostupné z www:
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15764
- [20] Souřadnicový zapisovač Colorgraf Aritma 512 [cit. 2012-3-5]. Dostupné z www:
<http://www.simandl.cz/stranky/elektro/colorgraf/colorgraf.htm>
- [21] Termovizní diagnostika FV panelů [cit. 2012-5-2]. Dostupné z www:
<http://www.vaseenergie.cz/termovizni-diagnostika-fotovoltaiky/>
- [22] Návod k obsluze Colorgraf Aritma 0512, vydáno leden 1990